REDES OPTICAS • HABITOS SOCIALES DE LOS CHIMPANCES

INVESTIGACION y CIENCIA

MARZO 2001
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

LA NUEVA COSMOLOGIA

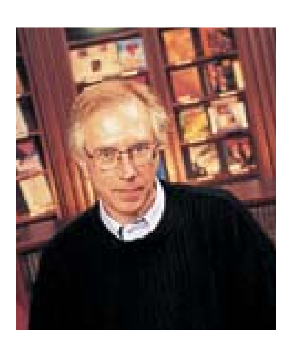
CRECIMIENTO VEGETAL • PROTEOSOMAS





Marzo de 2001 Número 294

SECCIONES







El cosmos extraño 57

La cosmología observacional está a punto de convertirse en una ciencia madura. Puede que la explicación de las cosas inesperadas y extrañas del universo esté a la vuelta de la esquina.

INFORME ESPECIAL

Redes ópticas: lo definitivo

Mediante ampliaciones con técnicas de fibra óptica, las redes van a alcanzar capacidades rayanas en lo infinito.



Prescindir de los conmutadores electrónicos liberará la red para transmitir datos a billones de bits por segundo.

La red óptica final dependerá de nuevos sistemas que procesarán información mediante ondas luminosas.

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



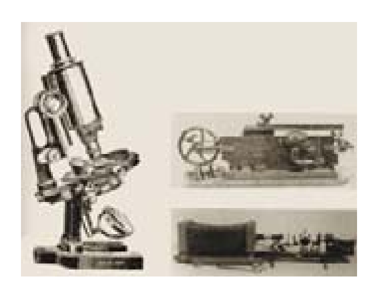




SECCIONES









Portada: Slim Films y Edward Bell

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4	Bernd Auers
5	Cleo Vilett; fuente: Vinod Khosla
6-8	Laurie Grace
9	Cleo Vilett
11	Lucent Technologies
12	Laurie Grace (*izquierda*); Lucent Technologies (*derecha*)
13	Laurie Grace (*arriba* e *izquierda*); Agilent (*derecha*)
14	Laurie Grace (*arriba*); Oleg Lavrentovich (*abajo*)
15	Laurie Grace
18-19	Slim Films
20-21	Laurie Grace
22-23	Audra Geras
24-27	Cleo Vilett
28-29	Gunter Ziesler
30	Michael Nichols
31	David Bygott
32-33	Patricia J. Wynne; Sue Carlson (*mapa*)
34	Sarah Marshall y Andrew Whiten
35	David Bygott
36	Kay Chernush
37	Inst. Howard Hughes de Medicina
49-51	Teresa Altabella y Antonio F. Tiburcio
52	Teresa Altabella y Antonio F. Tiburcio (*dibujo*); A. Kumar, reproducida de *The Plant Journal* vol. 9 (*fotografía*)
53-55	Teresa Altabella y Antonio F. Tiburcio
56	M. Pagès y A. Borrell
57	Alfred T. Kamajian, fuente: Centro Goddard de Vuelos Espaciales, NASA
58-59	Slim Films
60	Alfred T. Kamajian
61	Cortesía de Leven Wadley
62	Alex Desselle (*arriba*); G. White (*abajo*)
63	Cortesía de Robert R. Caldwell y Marc Kamionkowski
64-67	Don Dixon
68-69	Jana Brenning
70	Don Foley; fuente: R. R. Caldwell y Paul J. Steinhardt
71-73	Jana Brenning
76-78	Pilar Ruiz-Lapuente, SNAP
80	Telescopio Subaru, Observatorio Astronómico Nac. de Japón
81	Robert Gendler
82-83	Alfred T. Kamajian
84-85	Daniels & Daniels
86-87	Bryan Christie
88-89	George Retseck
90	Patricia J. Wynne

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Luis Bou: *El triunfo de la luz* y *Juegos matemáticos*; Esteban Santiago: *Proteosomas*; Cristina Lázaro: *Expresiones culturales de los chimpancés*; Juan Pedro Campos: *El cosmos extraño* y *Ecos de la Gran Explosión*; M.ª Rosa Zapatero: *Un cartógrafo cósmico* y *El universo y su quintaesencia*; Pilar Ruiz-Lapuente: *El sentido de la cosmología moderna* y *Una nueva teoría del universo*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace..., Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*; José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
MANAGING EDITOR Michelle Press
ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
ON-LINE EDITOR Kristin Leutwyler
EDITORS Mark Alpert, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky, George Musser, Sasha Nemecek y Sarah Simpson
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh
CHAIRMAN Rolf Grisebach

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta.	16.000 pta.
	52,89 euro	96,16 euro
Extranjero	11.500 pta.	21.500 pta.
	69,12 euro	129,22 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

ANTES DE LAS PRENDAS EXTERIORES INDUSTRIALES. «¿Qué tejidos nos aíslan mejor de las pérdidas de calor? Tal como se esperaba, los ensayos revelan que los tejidos de algodón calados ofrecen el menor índice de aislamiento. Una tela de algodón densa brinda una protección algo mejor, superada por la lana. Pero el índice de aislamiento disminuye muchísimo cuando los tejidos están húmedos; en la franela de algodón mojada, la pérdida térmica es mayor que cuando la superficie de ensayo está sin revestir. El estudio sugiere las siguientes vías de investigación para las ropas invernales: ropa interior que no absorba fácilmente la humedad, prendas de vestir que retengan grandes cantidades de aire en burbujas pequeñísimas y prendas exteriores acolchadas hechas de guata de plumas de gallina y algodón.»

QUÍMICA CELULAR. «Para la química de proteínas es de suma importancia conocer las cantidades exactas de cada uno de los veinte aminoácidos impares resultantes de la proteolisis. En 1945 los autores acometieron el análisis cuantitativo de los aminoácidos con ayuda de la cromatografía. Con esa herramienta se logró separar y determinar cuantitativamente cada uno de los veinte o más aminoácidos que aparecen en la degradación de una proteína. Se repite a menudo que muchas veces los avances científicos dependen del desarrollo de un buen método. La cromatografía ofrece un ejemplo palmario de lo cierto de esa afirmación. —William H. Stein y Standford Moore, Instituto Rockefeller de Investigaciones Médicas» [*Nota de la Redacción: Mediante métodos de análisis perfeccionados, los autores descubrieron la estructura de la ribonucleasa pancreática y ganaron el premio Nobel de química de 1972.*]

...cien años

CANALES EN MARTE. «El debate sobre el asunto sigue vivo. Mientras mister Lowell considera que los canales marcianos forman un vasto sistema de riego artificial, monsieur du Ligondès los ve como fisuras geológicas. Pero las enigmáticas líneas las han contemplado tantos, que las filas de los escépticos adelgazan. No así el signor Vincenzo Cerulli. Desde su observatorio privado de Collurania (cercano a la ciudad de Teramo), ha demostrado que las líneas y puntos regulares que hallamos en las tenues imágenes de Marte podrían atribuirse a la pobreza de nuestros medios ópticos e incapacidad para captar los detalles irregulares. Además, el origen artificial de los ‘canales’ marcianos apenas puede sustentarse ahora que se ha observado que atraviesan los casquetes polares y que aparecen en Venus, Mercurio y dos de los satélites de Júpiter. —Mary Acworth Orr»

AEROPLANO. «El último intento de resolver el problema del vuelo artificial lo ha protagonizado Wilhelm Kress, ingeniero, quien durante veinte años ha laborado pacientemente sobre un aeroplano en el que ha materializado sus ideas. El aparato, una embarcación con patines dotada de velas arqueadas, es impulsado por dos hélices de vela a las que hace girar, en sentidos opuestos, un motor de bencina (*véase ilustración*). Las pruebas preliminares han tenido éxito.» [*Nota de la Redacción: El avión se estrelló al despegar.*]



El sueño de volar: antes de la caída, 1901

LAS TRAMPAS NUNCA PROSPERAN. «Desde Boone (Iowa), un comunicante nos envía cinco dólares y algunos apuntes de una mesa que está construyendo, evidentemente pensada para alguna casa de juegos. En el centro de la mesa y bajo el paño hay una placa de hierro dulce, que puede ser imanada mediante una corriente eléctrica. De ese modo pueden manipularse a voluntad del operador dados cargados. Desea que le ayudemos a resolver algunos problemas de diseño. Le hemos devuelto el soborno ofrecido y hemos aprovechado la oportunidad para informarle de que no nos place ser cómplices de su delito.»

...ciento cincuenta años

LLAGA ABIERTA. «La población de Estados Unidos asciende a 20.067.720 personas libres y 2.077.034 esclavos.»

EL PALACIO DE CRISTAL. «El Gran Palacio de Cristal, tal como ha sido denominado el edificio que albergará la Exposición Industrial Mundial, ya está casi acabado. Algunos científicos objetan su aparente falta de solidez. Al mirarlo, con su enorme tamaño y fragilidad casi femenina, es natural una sensación de inseguridad en lo referente a su robustez, ya que estamos tan acostumbrados a contemplar grandes estructuras, apoyadas en enormes pilares pétreos, que tendemos a olvidar la superior robustez del hierro, del que se compone principalmente el edificio.»

EL TRIUNFO DE LA LUZ

Mediante ampliaciones con técnicas de fibra óptica, las redes van a alcanzar capacidades rayanas en lo infinito

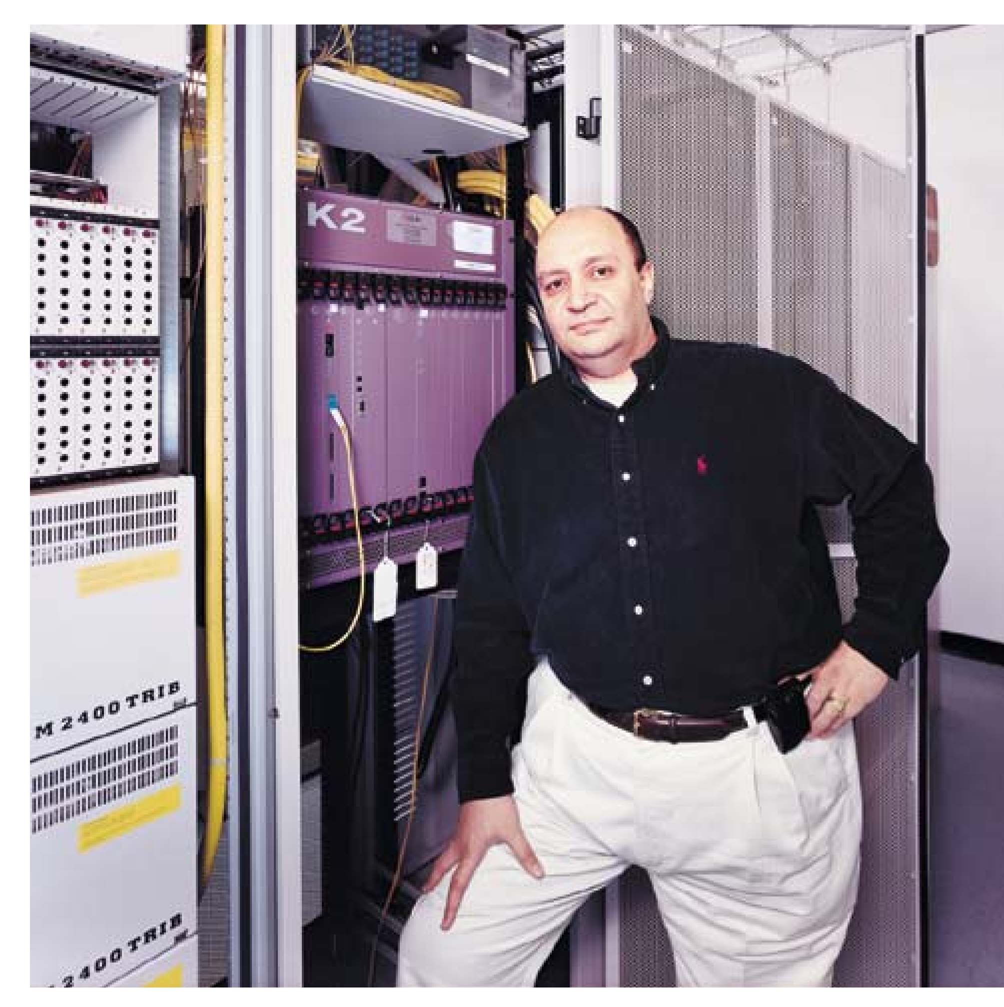
Gary Stix

Al tiempo que aumenta la demanda de redes de mayor capacidad, puede que la fiebre que Napster, famoso servicio de intercambio de archivos musicales, ha provocado sea sólo indicadora de la apertura de la primera de muchas compuertas. El capital especulativo, de hecho, ha apostado ya miles de millones de dólares en técnicas tendentes a ayudar a las compañías de telecomunicaciones a contrarrestar las perspectivas de que una Internet saturada se venga abajo.

En las conferencias de la industria, se insiste hasta la saciedad —cómo no, mediante proyecciones en PowerPoint— que el diluvio aún está por llegar. Un billón de bits por segundo —el tráfico medio en las grandes arterias de Internet, las líneas troncales, donde más intenso es el tráfico— no permitiría atender ni a la milésima parte de las futuras demandas. La realidad virtual en la Red podría sobresaturar dichas arterias al exigir flujos de hasta 10 petabits por segundo, unas 10.000 veces más que los actuales. (Un petabit equivale a 1000 billones de bits, o sea, 10^{15} bits.) Y los sistemas de ordenadores que comparten sus mutuas capacidades de cómputo por la red —en la llamada "metacomputación"— podrían exigir hasta 200 petabits por segundo.

Si tales supuestos se materializan, el único medio de transmisión que podría acercarse a esta demanda en apariencia infinita es la fibra óptica. Las fibras ópticas pueden abrir canales cuya anchura de banda sea centenares de miles de veces mayor que las transmisiones de microondas o los enlaces vía satélite, sus competidores más cercanos para las comunicaciones a larga distancia.

Ha empezado ya la carrera para aumentar el contenido de fibra en las redes de todo el mundo. El cable tendido cada día sería suficiente para dar tres vueltas a la Tierra. De continuar los perfeccionamientos en las fibras ópticas, la capacidad de transporte de una sola fibra podría al-



canzar cientos de billones de bits por segundo en cosa de un decenio; ciertos "tecnoloides expertos en utopías" prevén ya la próxima arribada de marcas cifradas en petabits. Sin embargo, la superación de tal barrera va a exigir, por una parte, descubrimientos fundamentales y, por otra, la puesta en servicio de técnicas que hoy por hoy tienen mucho más de física experimental que de equipos listos para su emplazamiento en las redes de datos y telefonía con cobertura estatal.

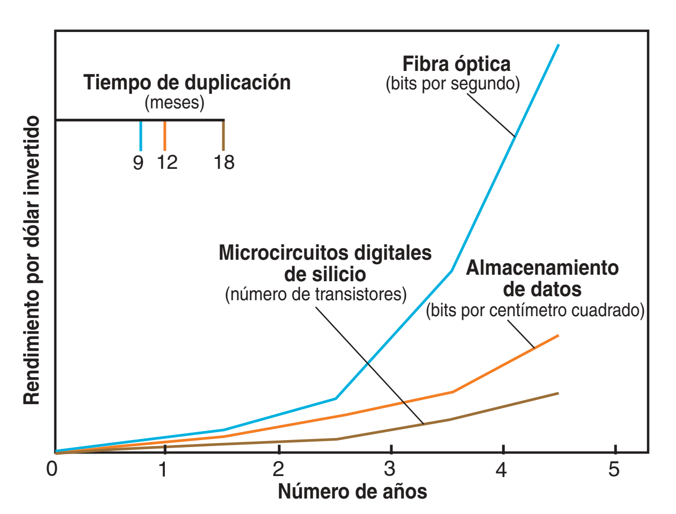
A más corto plazo, va a quedar anticuada toda una categoría de sistemas electrónicos de conmutación, superados por nuevas técnicas fotónicas, que, para encaminar las señales, se valen no de electrones, sino de espejos. Como suena. En la actualidad, las velocidades de transmisión de las redes más avanzadas —que operan a 10.000 megabits por segundo— amenazan ya con sobrecargar las unidades de procesamiento y de memoria de los microcircuitos utilizados en las centrales de la red conmutada existente. Y conforme la velocidad de la red va superando la velocidad del procesador, se pone por las nubes el coste de los sistemas electrónicos empleados en las transmisiones ópticas. El torrente de gigabits contenido en una onda luminosa de la fibra ha de fragmentarse en flujos más lentos de datos, susceptibles, para su procesamiento, de conversión en electrones, para volverlos después a integrar en una riada de bits que fluya a gran velocidad. Los equipos de paso de fotones a electrones, y éstos a fotones, no sólo ralentizan el tráfico en la "superautopista", sino que elevan también de forma exorbitante el costo de los equipos.

Mientras los diseñadores de redes consideran la posibilidad de que se produzca una sobrecarga de los equipos, centenares de compañías, grandes y pequeñas, afrontan la creación de redes capaces de sacar partido de toda la anchura de banda de la fibra. ¿Cómo? Mediante la transmisión, combinación, amplificación y conmutación de las longitudes de onda sin tener que convertir la señal óptica en señales electrónicas. La fotónica se encuentra en el estadio en que se hallaba la electrónica hace 30 años, cuando procedía al desarrollo e integración de los distintos componentes en sistemas y subsistemas mayores. Una marea creciente de capital-riesgo está financiando las iniciativas. En los nueve primeros meses del año 2000, la inversión especulativa para redes ópticas sumó 3400 millones de dólares, frente a los sólo 1500 invertidos en todo el año 1999, ritmo que, no obstante, parece haber decaído en los últimos meses.

Las inversiones en comunicaciones ópticas están ya produciendo dividendos, si se compara la fibra óptica con la electrónica al uso. El costo de transmisión de un bit por vía óptica se reduce a la mitad cada 9 meses, mientras que el logro de la misma reducción de costos para un circuito integrado requiere unos 18 meses (esta última métrica es famosa con el nombre de ley de Moore). "Debido a los impresionantes avances en la capacidad y ubicuidad de los sistemas y subsistemas de fibra óptica, la anchura de banda resultará demasiado barata para poder medirla", pronostica A. Arun Netravali, presidente de Lucent Technologies, en un número reciente de la revista *Bell Labs Technical Journal*.

1. UNA ONDA LUMINICA portadora de 40 millardos de bits por segundo corre por el interior de esta fibra amarilla, proporcionada por una compañía recién nacida, Enkido, fundada por Nayel Shafei.

Pronósticos de igual jaez sobre una hipotética gratuidad de la energía obsesionaron a la industria de la energía nuclear. Y el futuro de las redes de banda ancha, por las que una película de larga duración pueda transmitirse con la facilidad con que enviamos un mensaje electrónico, no es todavía una apuesta segura. Hace diez años, los proveedores de telecomunicaciones y las compañías mediáticas empezaron a prepararse para la convergencia digital del ocio y las redes. Quinientos canales. Vídeo bajo pedido. Seguimos esperando. Entretanto, Internet, tenida en tiempos por una curiosidad tecno-exhibicionista para uso del Gobierno y de escolares, se ha transmutado en la red cuyas mallas han atrapado al mundo. La mensajería electrónica y los "sitios" de la Telaraña se han impuesto.



2. LA FIBRA VA EN CABEZA en cuanto a la aceleración del rendimiento. El número de bits por segundo (una medida del rendimiento de la fibra) se duplica cada nueve meses por cada dólar invertido en la técnica. En cambio, el tiempo de duplicación del número de transistores de los microcircuitos integrados se duplica cada 18 meses, tendencia conocida por ley de Moore. En un período de cinco años, la técnica óptica rebasa con mucho a los microcircuitos de silicio y al almacenamiento de datos.

Y se hizo la luz

Los pronósticos de anchura de banda sin límite —fundamento de las especulaciones sobre realidad virtual en red y sobre el vídeo de alta definición— son de añada reciente. AT&T y GTE instalaron los primeros sistemas de fibra óptica en la red de comunicaciones comerciales en 1977, estando los miniordenadores en su apogeo y los microcircuitos apenas destetados. Una fibra consta de un núcleo de vidrio revestido de una capa envolvente, la funda. Los índices de refracción del núcleo y la funda (números que miden la capacidad del material para desviar la luz en mayor o menor grado) han sido elegidos con esmero con el fin de asegurar que los fotones que se propagan en el núcleo sean siempre reflejados en la interfase con la funda. La luz sólo puede penetrar o salir de la fibra por sus extremos. Para comprender los aspectos físicos del funcionamiento de la fibra, imagine el lector que mira hacia el interior de un estanque con el agua en calma. Si mira directamente hacia abajo, podrá ver el fondo. Pero si mira con ángulos casi rasantes res-

pecto a la superficie del agua, percibirá luz reflejada. Un emisor de luz —sea un diodo fotoemisor, sea un láser— envía por la fibra óptica datos electrónicos que han sido convertidos en fotones de una longitud de onda comprendida entre los 1200 y los 1600 nanómetros.

En la actualidad, existen fibras de pureza tal, que una señal lumínica puede viajar por ellas unos 80 kilómetros sin necesidad de amplificación. No obstante, llega un momento en que debe reforzarse la señal. El siguiente paso importante en la senda hacia las redes enteramente ópticas se dio a principios de los años noventa, época en que esta técnica logró formidables avances. Fue entonces cuando los elementos electrónicos de amplificación de señales fueron reemplazados por tramos de fibra en la que habían infundido iones de erbio, un elemento del grupo de las tierras raras. Cuando estas fibras dopadas con erbio eran excitadas con un láser de bombeo, los iones excitados devolvían nueva vida a la señal debilitada. Los amplificadores han llegado a ser mucho más que empalmes de fontanería para tubos de luz. Restablecen una señal sin necesidad de conversión opto-electrónica, y pueden hacerlo para señales de muy alta velocidad que envían decenas de gigabits por segundo. Y lo que reviste tal vez mayor interés, pueden reforzar simultáneamente la potencia de muchas longitudes de onda.

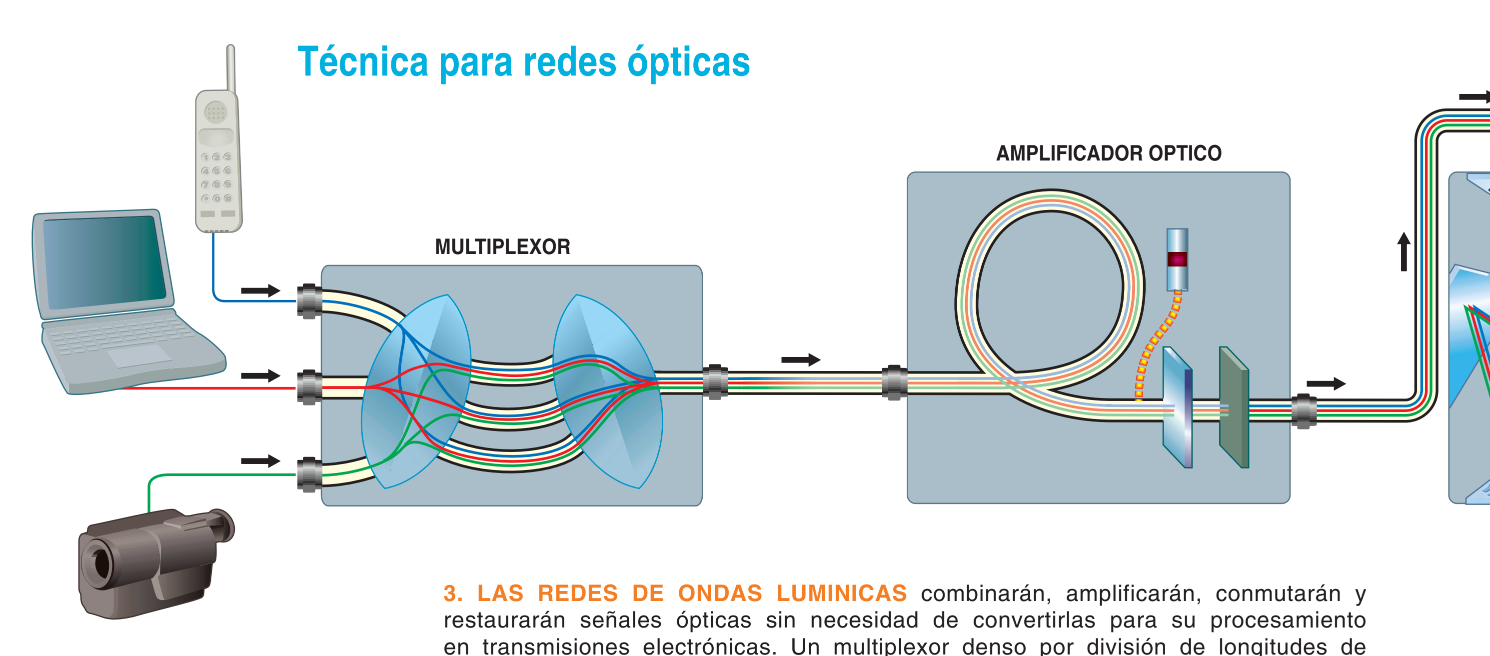
A tamaña capacidad para encauzar por una misma fibra una multitud de longitudes de onda obedece, en buena medida, la frenética demanda que han tenido las compañías de redes ópticas en los mercados financieros. Siendo ya posible reforzar la intensidad de muchas longitudes de onda, el paso inmediato consiste en saturar la fibra con el máximo número posible de ellas, y, por otra parte, lograr que una misma longitud de onda sea portadora del máximo volumen de datos. La técnica correspondiente ya tiene nombre: DWDM, o sea, multiplexación densa por división de longitudes de onda.

La técnica DWDM provocó la explosión de la anchura de banda. Con la técnica de multiplexación, la capacidad de cada fibra se expande por el número de longitudes de onda, cada una de las cuales puede ser portadora de más datos de los que antes podía transportar una fibra individual. En la actualidad es posible enviar 160 frecuencias simultáneamente, lo que proporciona una anchura de banda de 400 gigabits por segundo por fibra. Todas las grandes empresas de telecomunicaciones han desplegado la técnica DWDM, lo cual multiplica la capacidad de la fibra ya instalada en el subsuelo, y lo consigue con un gasto que puede ser la mitad de lo que costaría un nuevo tendido de cable, al tiempo que el equipo puede ser instalado en una fracción del tiempo requerido para excavar las zanjas.

Mientras tanto, en los laboratorios, los experimentos se orientan a maximizar la capacidad de la fibra; se ensaya con docenas de distintas longitudes de onda, moduladas, cada una, a 40 o más gigabits por segundo, buscando lograr tasas efectivas de transmisión de unos pocos terabits por segundo. (Alguna compañía ha instalado ya enlaces comerciales que utilizan longitudes de onda capaces de 40 gigabits por segundo.) El índice de ocupación de la fibra no va a disminuir a corto plazo y podría llegar a alcanzar los 300 o 400 terabits por segundo, y, con nuevos avances técnicos, superar —quién sabe— la barrera del petabit por segundo.

Pero las redes de telecomunicaciones no consisten en enlaces punto a punto. Requieren de centrales de conmutación que encaminen el flujo digital hacia su destino definitivo. Las enormes conducciones de bits que pululan en los bancos de prueba de los laboratorios de nada van a servir si las riadas lumínicas han de ser direccionadas por conmutación electrónica al uso. Tal proceder supondría la conversión de una señal multiterabítica en decenas o centenares de señales electrónicas mucho más lentas. Y después, las señales conmutadas tendrían que ser reconvertidas en fotones y reintegradas en canales lumínicos, para su envío posterior por una fibra óptica eferente designada.

El costo y la complejidad de la conmutación electrónica han provocado una estampida desenfrenada, que busca la forma de dar con un procedimiento para reencaminar, ya sea las longitudes de onda individuales, ya la señal luminosa completa con-



3. LAS REDES DE ONDAS LUMINICAS combinarán, amplificarán, conmutarán y restaurarán señales ópticas sin necesidad de convertirlas para su procesamiento en transmisiones electrónicas. Un multiplexor denso por división de longitudes de onda (DWDM) tomará distintas longitudes de onda y las introducirá en una sola conexión por fibra. Un amplificador óptico reforzará las señales. Un conmutador

tenida en una fibra desde una vía a otra, sin pasar por la conversión optoelectrónica. Los equipos de investigación, con frecuencia en instalaciones precarias, están haciendo pruebas con espejos microscópicos, con cristales líquidos y con láseres rápidos, en un afán común por crear conmutadores totalmente ópticos.

La conmutación puramente óptica, sin embargo, diferirá de forma esencial de los sistemas de las redes existentes, que conmutan paquetes individuales de bits de datos, como se hace en el protocolo de Internet (IP). A los sistemas electrónicos de los distribuidores ("routers") o de las grandes centrales telefónicas de conmutación les resulta sencillo leer en cada paquete la dirección que indica su destinatario. Los procesadores fotónicos, que se encuentran aproximadamente en la misma fase de desarrollo que la electrónica en los años sesenta, sólo han demostrado capacidad para leer paquetes en experimentos de laboratorio.

Los conmutadores ópticos que van hacia el mercado caminan sobre las huellas dejadas por los equipos electrónicos de generaciones anteriores. Estarán capacitados para conmutar un circuito —una longitud de onda, o quizá todo el contenido de una fibra— de una vía a otra, dejando intactos los paquetes de datos de la señal. Una señal electrónica situará al conmutador en la posición correcta, de modo que encamine a una fibra aferente —o las longitudes de onda portadas por la fibra— hacia una determinada fibra eferente. Ninguna de las longitudes de onda será, empero, convertida en electrones para su procesamiento.

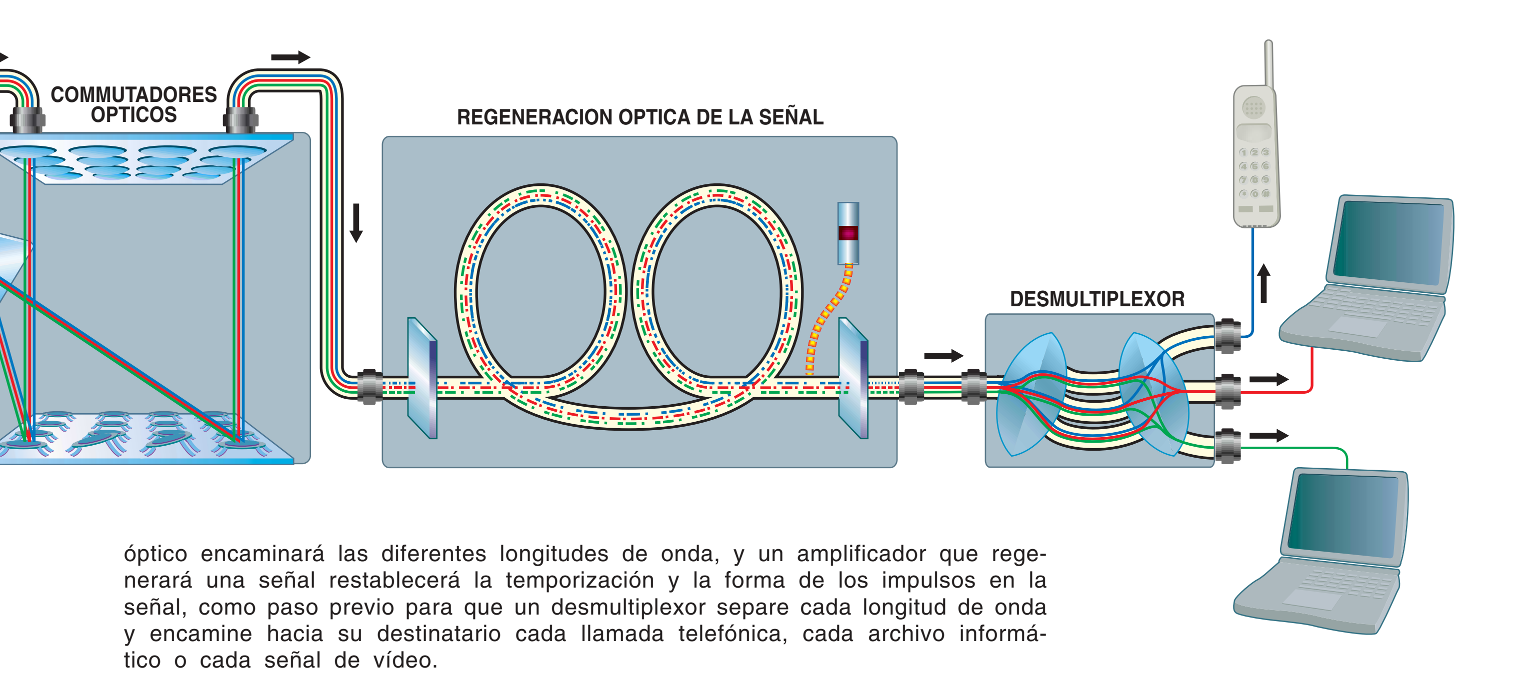
Aun así, puede que los circuitos de conmutación óptica constituyan tan sólo una etapa provisional. Conforme las redes vayan intensificando su celeridad, es posible que las compañías de comunicaciones exijan lo que podría convertirse en toque final que corone la conmutación totalmente óptica, a saber, la conmutación de paquetes individuales mediante procesadores ópticos.

Con el advenimiento de la conmutación óptica por paquetes, será necesario que los paquetes individuales sean leídos y encaminados hacia los puntos fronterizos de las redes ópticas (en las redes telefónicas locales: las cercanías de los puntos donde sean enviadas o recibidas). Por el momento, dicha tarea sigue encomendada a distribuidores electrónicos. Aun así, la evolución de las redes ópticas inducirá variantes en la concepción y realización de las redes. La conmutación óptica puede acabar dejando anticuadas las técnicas hoy existentes sobre ondas lumínicas, basadas en el omnipresente estándar de comunicaciones llamado SONET (de "Synchronous Optical Network"); esta red óptica sincrónica se funda en la electrónica para la conversión y procesamiento de los paquetes individuales. Y tal proceso puede ir parejo con la gradual desaparición de la modalidad de transferencia asíncrona ATM (de "Asynchronous Transfer Mode"), otro de los estándares de las compañías telefónicas para la transmisión de información por paquetes.

En este mundo nuevo, cualquier tipo de tráfico, ya sea de voz, de vídeo o de datos, puede viajar "enlatado" en paquetes IP. En tal caso, una promesa anunciada en las telecomunicaciones desde hace por lo menos 20 años, a saber, la plena integración de voz, vídeo y servicios de datos, quedará cumplida.

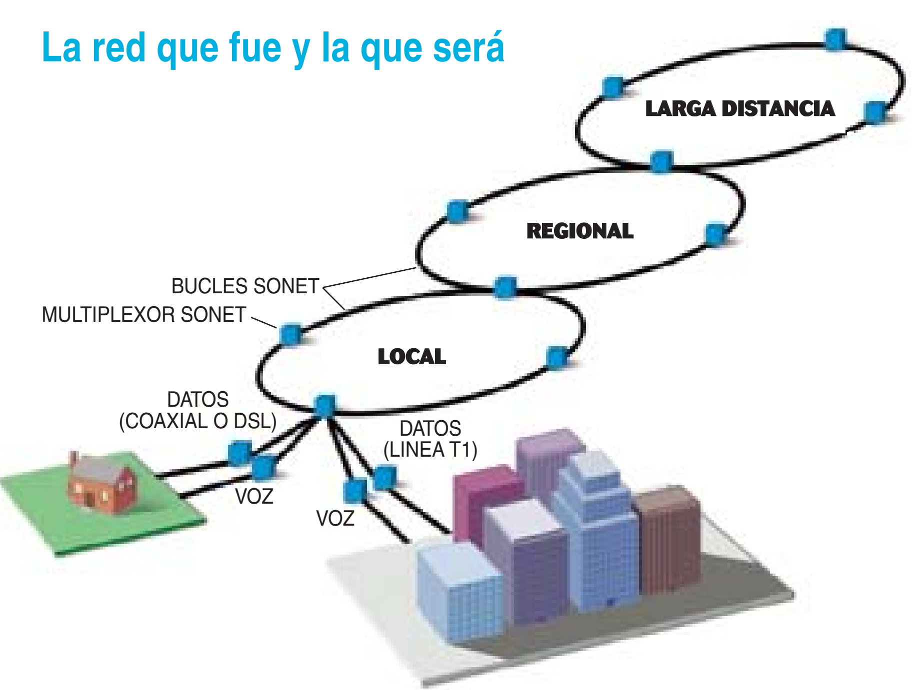
Estas Navidades, al llamar a la familia, es posible que la conversación fuera transmitida mediante paquetes IP que se desplazaron por Gigabit Ethernet, una versión para la "superautopista" de una conocida y ubicua red de área local. Gigabit Ethernet, a su vez, operará sobre fibra óptica con multiplexación en longitud de onda. Los críticos de esta metodología dudan de que tal red pueda proporcionar un servicio de la misma calidad que ATM y SONET, y que posea la capacidad de estos sistemas para reconducir automáticamente las conexiones cuando quede cortada una fibra óptica.

La vida sería más sencilla, empero. La red telefónica pasaría a ser meramente una gran red de área local. Bastaría enchufar una tarjeta Ethernet en un ordenador, a un teléfono o una televisión, para disponer de una solución mucho más rápida y económica que la instalación de nuevas conexiones físicas SONET. Algunas compañías están preparándose ya para el día en que el rey absoluto sea el protocolo IP. Una opera-

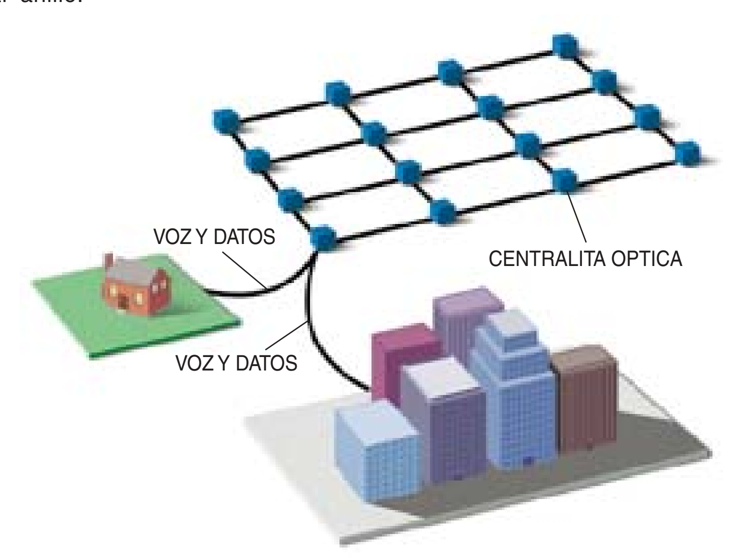


óptico encaminará las diferentes longitudes de onda, y un amplificador que regenerará una señal restablecerá la temporización y la forma de los impulsos en la señal, como paso previo para que un desmultiplexor separe cada longitud de onda y encamine hacia su destinatario cada llamada telefónica, cada archivo informático o cada señal de vídeo.

La red que fue y la que será



4. LAS REDES AVANZADAS ACTUALES mantienen en su mayor parte conexiones electrónicas separadas para la voz y los datos. Logran fiabilidad mediante bucles basados en un estándar de comunicaciones llamado SONET (Red Optica Sincrónica): si uno de los enlaces queda cortado, el tráfico fluye por la otra mitad del anillo. El multiplexor SONET agrega tráfico al anillo.



5. LAS REDES DEL MAÑANA canalizarán todo el tráfico por una misma conexión de fibra óptica. Proporcionarán redundancia merced a la malla Internet, con sendas entrecruzadas. Cuando una línea se interrumpa, el tráfico podrá seguir fluyendo por otras sendas. La conmutación óptica será el fundamento para la construcción de estas redes integradas.

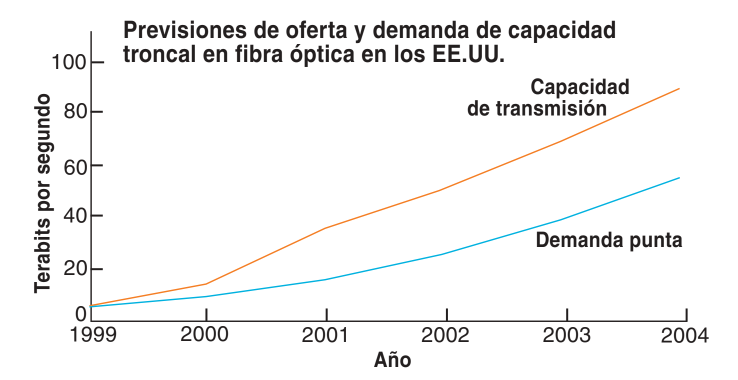
dora con base en Denver, Level 3 Communications, ha tendido una red internacional de fibra óptica de más de 30.000 kilómetros, por los Estados Unidos y fuera de ellos. Aunque la red todavía está basada en SONET, su director James Q. Crowe prevé el día en que estas costosas herencias de la red de voz se esfumen y pierdan en la nada. "El sistema va a consistir en un protocolo Internet instalado sobre Ethernet, y la Ethernet, operando en sistemas ópticos", asevera.

Luz a domicilio

Aunque los ingenieros de redes consigan dejar mondo el rimero de protocolos que con tan pesado lastre cargan la red de nuestros días, tendrán todavía que enfrentarse al problema del "último kilómetro": llevar la fibra desde las cajas de registro instaladas en la acera hasta las salas de estar o los despachos de los domicilios. Algunos constructores están instalando, ya en obra, tendidos de fibra en sus nuevas construcciones, anticipándose al día en que los hogares reciban sin más trámite su propio enlace óptico. Pero los costos siguen cerniéndose sobre cualquier análisis de la instalación doméstica de la fibra. Hasta hace poco, los equipos avanzados para redes ópticas, como los DWDM, eran demasiado onerosos para tomarlos en consideración en redes telefónicas regionales. Llevar el equipo hasta un paño de pared de cada piso de un edificio por plantas, con un costo de unos 1500 a 2000 euros por línea, es hoy por hoy bastante más de lo que mucha gente está dispuesta a pagar. Son muchos —la gran mayoría— quienes no disponen siquiera de una conexión de 1 megabit por segundo. No está claro, pues, cuándo llegará el momento en que el hogar de tipo medio vaya a necesitar los gigabits imprescindibles para comunicarse por proyección holográfica con un domicilio vecino en lugar de limitarse a descolgar el teléfono.

Los ingenieros se las han de ver con, y resolver, toda una colección de engorrosos problemas técnicos antes de que sean corrientes las redes ópticas. Incluso instalada la conmutación de longitud de onda, una parte crítica de la red exige la conversión a electrónica. Cada 150 kilómetros, más o menos, una longitud de onda debe convertirse de nuevo en señal electrónica para restaurar la forma y la temporización de los impulsos individuales dentro del inmenso tren de bits que la ocupan.

Los proveedores de equipo han de luchar también a brazo partido con los logros de la electrónica. Los proveedores de componentes trabajan en métodos para construir módulos donde se integren láseres, fibras y redes de difracción (que permiten la separación de longitudes de onda). Pero la construcción de circuitos fotónicos integrados sigue siendo difícil. Los fotones carecen de carga eléctrica, a diferencia de los electrones, que la tienen negativa. No existe nada similar a un dispositivo de almacenamiento de carga —lo que pudiéramos llamar un condensador fotónico— capaz de alojar indefinidamente los fotones representantes de unos y ce-



PREVISIONES DE FUTURA DEMANDA DE ANCHO DE BANDA	
Aplicaciones	Anchura de banda troncal (terabits por segundo)
Realidad virtual en Internet	1000 a 10.000
Holografía tridimensional y telepresencia	30.000 a 70.000
Metacomputación	50.000 a 200.000
Agentes de Internet	50.000 a 200.000

1 terabit = 1 billón (10^{12}) bits

6. EL DESFASE ENTRE LA DEMANDA correspondiente a líneas troncales de fibra óptica —los enlaces más intensamente utilizados— se aprecia en un estudio de la compañía consultora Adventis, que indica que la oferta va a ser mayor que la demanda. Empero, nuevas aplicaciones, como las de realidad virtual y metacomputación, podrían exigir inmensos incrementos en la anchura de banda óptica, por encima de los pocos terabits por segundo que se necesitan en la actualidad para atender la demanda en las líneas troncales de los Estados Unidos.

ros. Además, resulta difícil construir circuitería fotónica del tamaño de los circuitos integrados electrónicos, porque la longitud de onda de la luz infrarroja utilizada en los láseres de fibra óptica ronda en torno a las 1,5 micras, lo cual impone límites físicos intrínsecos a la miniaturización de los componentes. Los circuitos electrónicos alcanzaron la dimensión de micras hace más de diez años.

La buena noticia es que las compañías están esforzándose ahora en resolver los problemas de restauración de la señal y otros; disponen, además, de buenas reservas de capital riesgo para financiarlas. Este campo, orlado ya del aura que rodea a la genómica y hace un tiempo disfrutaron los valores "punto-com", se ha convertido en un modelo de investigación, nuevo y turboalimentado. Las pequeñas empresas avanzan hasta que logran ofrecer alguna prueba de que sus promesas pueden traducirse en cumplimientos, y entonces son adquiridas por una Nortel, una Cisco o una Lucent.

"Es un mundo de locos," afirma Alastair M. Glass, director de fotónica en Lucent. "Cualquiera puede llegar con sus ideas más disparatadas y lograr financiación para ellas, y tal vez le sean después compradas por buen dinero. Y eso a pesar de que jamás han fabricado un producto." Y añade: "Jamás había ocurrido tal cosa en el pasado. Ello se debe, en parte, a que las compañías necesitan gente, así que están comprando gente. Pero otras veces están comprando técnica porque carecen de ella en la empresa; en más de una, no saben lo que están comprando." El tránsito de la idea a su desarrollo es rápido: un artículo publicado en *Science* en 1998 sobre un "espejo perfecto", basado en un material dieléctrico (un aislante) que refleja con pequeña pérdida de energía la luz incidente en cualquier ángulo, inspiró la fundación de una compañía que desea crear una fibra hueca cuyo perímetro interior está revestido con ese reflectante. Estas fibras podrían multiplicar por 1000 la capacidad de las fibras tradicionales, según proclama un empleado de la firma.

¿Habrá clientes?

¿Qué se puede hacer con toda esta anchura de banda? Lucent estima que, si el crecimiento de las redes continúa al ritmo actual, el mundo tendrá, hacia el año 2010, suficiente capacidad para proporcionar a cada individuo una anchura de banda de 100 megabits por segundo, ya se encuentre en Silicon Valley o en Sri Lanka. Tal anchura de banda es suficiente para docenas de conexiones de vídeo o para varios programas de televisión de alta definición. Pero, ¿se usarán?

A pesar de las estimaciones que afirman que el tráfico en Internet se duplica cada pocos meses, los observadores de la industria no están tan seguros de que exista una demanda infinita para una anchura de banda infinita. Algunos pronostican que solamente de un 15 a un 20 por ciento de usuarios domésticos contarán hacia el año 2004 con accesos de banda ancha a Internet, sea con módems de cable coaxial o con líneas de suscripción digital. Además, si se almacenan en un servidor las páginas de Internet de acceso más frecuente se reducirá la carga sobre la Red. Según las estimaciones de la empresa Adventis, en los Estados Unidos, alrededor del 40 por ciento de la capacidad de la fibra existente quedará sin utilizar y, en Europa, el porcentaje de fibra "dormida" podrá alcanzar casi el 65 por ciento. La idea de sobreabundancia de capacidad no es, sin embargo, opinión generalizada.

Al final, es probable que las redes con capacidades de terabits o petabits fructifiquen sólo después de que aflore alguna forma aún no prevista de sacar partido a tal anchura de banda. Al igual que la Malla Máxima Mundial, que fue en principio un proyecto para facilitar el intercambio de información en física de partículas, puede que el éxito de la banda ancha resulte de efectos impensados, y no sea fruto de la acción deliberada de reempaquetar y transferir realidad virtual por la Red. Vinos Koshla habla de la promesa de proyectos que integren ordenadores que lo mismo puedan hallarse contiguos que distribuidos por todo el planeta. La metacomputación puede "volcar" películas insulsas o puede ir filtrando los datos de los radiotelescopios, tratando de localizar vida extraterrestre. Koshla ve inmensos beneficios en la utilización empresarial y comercial de este modelo de computación, que vincularía entre sí a máquinas para que trabajasen, por ejemplo, en los problemas de dinámica de fluidos que entraña un avión de línea con capacidad para 1000 pasajeros.

Así pues, las tentativas de captar las emisiones de radio procedentes de miles y miles de millones de galaxias podrían proporcionar indicios útiles sobre lo que se podría hacer en la Tierra con una red que pulsa a razón de un trillón de bits por segundo.

En el siglo XIX era tanta la prisa por extender el ferrocarril que se tendían las vías incluso antes de haber concluido la infraestructura de enlace. Se daba el caso de que un tramo de vía terminaba a orillas de un río importante y, al no existir puente, se transbordaban los pasajeros a otro tren en la orilla opuesta para proseguir el viaje. El proceso era fastidioso y lento; una vez construidos todos los puentes y viaductos, se ahorraron horas en el transporte de personas y mercancías. Un ejemplo reciente ha sido el túnel bajo el Canal de la Mancha, que evita las travesías en barco y abrevia notablemente la duración del viaje.

Algo similar sucede en nuestros días en el mundo de las redes de transmisión óptica. Es muy frecuente enviar datos a través de fibras ópticas que interconectan centrales u oficinas. Sin embargo, los conmutadores que reencaminan el tráfico entre los diferentes trayectos de la red utilizan señales eléctricas, no luminosas, y por ello las señales de voz, datos o vídeo han de abandonar la gran autopista óptica y atravesar un intercambiador de baja velocidad para pasar a otra ruta óptica. Es decir, la luz que llega por la fibra óptica tiene que convertirse en corriente eléctrica para accionar el conmutador, y después volver a ser luz para continuar su viaje por otro tramo de fibra. Todo esto cuesta tiempo y dinero.

La conversión óptica-electrónica-óptica plantea otro problema, cada vez más apremiante: la congestión electrónica creada por el diferente ritmo de progreso de la electrónica y la fotónica (nombre dado a la técnica de las redes ópticas). Si la velocidad de operación en electrónica crece sin cesar, las prestaciones de la fotónica todavía avanzan más deprisa y dejarán gradualmente atrás las posibilidades que ofrece la técnica electrónica. Hasta los más rápidos procesadores irán encontrando dificultad creciente para abordar la miríada de bits que inundará el conmutador electrónico.

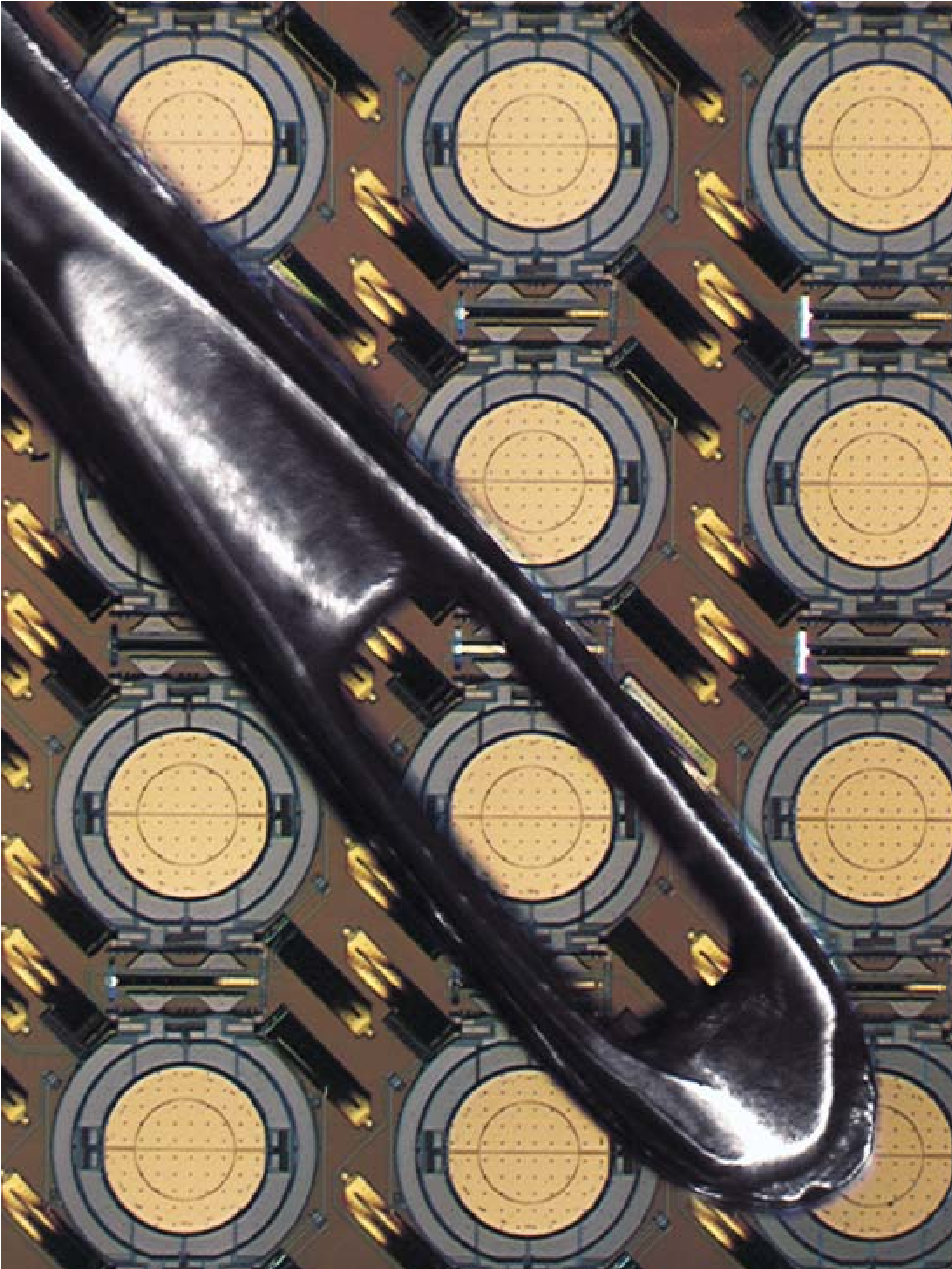
Así pues, en las redes de telecomunicación de la próxima generación no bastará con transmitir información por fibra de punto a punto, a través de largas distancias; será preciso acometer la conmutación de señales ópticas para evitar conversiones optoelectrónicas susceptibles de congestionar la red. En respuesta a este desafío, llegan hoy al primer plano los conmuta-

1. LOS MICROESPEJOS reflejan las ondas de luz de una fibra óptica en otra.

AMANECER DE LA CONMUTACION OPTICA

La sustitución de los conmutadores electrónicos por otros puramente ópticos será la pieza clave de redes que transmitan billones de bits por segundo

David J. Bishop, C. Randy Giles y Saswato R. Das



DAVID J. BISHOP y C. RANDY GILES intervinieron en la creación del conmutador óptico MEMS de Lucent Technologies. Bishop dirige el departamento de investigación electromecánica de Bell Laboratories. Giles encabeza el grupo de investigación de subsistemas fotónicos en dichos Bell Labs. SASWATO R. DAS, publicista, es portavoz de Bell Labs. Este artículo no se habría escrito sin la ayuda de muchas personas, entre ellas Alastair Glass, Richard Slusher y Alice White.

dores fotónicos, construidos con espejos microscópicos, burbujas u otras nuevas técnicas.

Cabe recordar aquí el significado y la función del "conmutador". Al popularizarse los teléfonos, había que unir entre sí varias líneas para que la señal eléctrica llegase de un abonado a otro. Al principio, las operadoras telefónicas conectaban manualmente los circuitos. Aparecieron luego los relés electromecánicos, origen de las primeras centrales de conmutación automática. Hoy en día, la conmutación del tráfico telefónico y de datos se realiza por medio de ordenadores electrónicos especializados que controlan las señales transmitidas y las encaminan a su destino, ya sean éstas señales de voz, de vídeo o los paquetes de datos que constituyen un mensaje o fichero digital.

La conmutación óptica revoluciona el diseño de las redes. Dado el ingente volumen de tráfico, los conmutadores electrónicos no pueden evacuar llamadas telefónicas o mensajes de correo electrónico individuales recibidos por fibras a velocidades de hasta billones de bits por segundo (10^{12} bit/s). Se canalizarán decenas o centenares de longitudes de onda por cada fibra —en una longitud de onda se empaquetan miles de llamadas o miles de millones de bits de datos— y se enviarán a una o varias fibras eferentes entre los centenares existentes. Otra posibilidad es la de no transferir la propia longitud de onda, sino traspasar la información que contiene a otra longitud de onda por una fibra de salida. Sólo cuando las llamadas telefónicas o los paquetes de datos de Internet lleguen cerca de su destino serán conmutados separadamente por procesadores electrónicos; estos conmutadores podrían incluso prescindir de la electrónica cuando se desarrollen nuevas técnicas fotónicas.

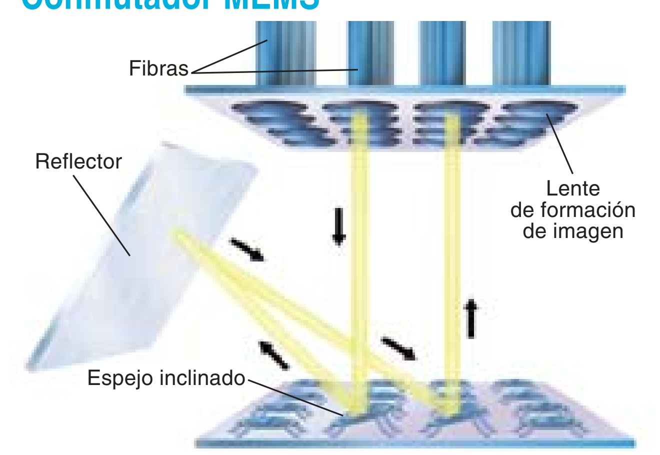
Terabits por segundo

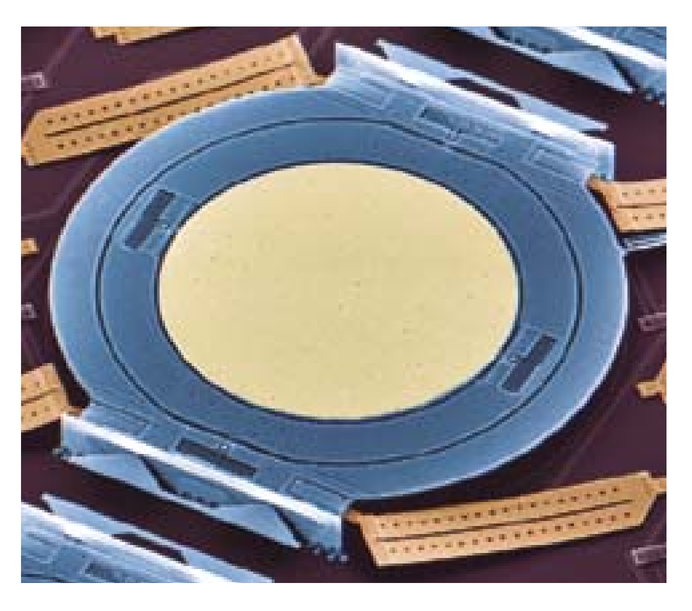
Entre tanto, el desafío técnico que supone conmutar fibras enteras o longitudes de onda individuales dentro de esas fibras puede acobardar al más templado. Los conmutadores de longitudes de onda ópticas, o transconectores, deben encaminar la luz que llega en ciertas longitudes de onda a cualquier fibra eferente disponible. Dicho así, no parece muy difícil; después de todo, los conmutadores telefónicos lo resuelven con eficacia siempre que un abonado llama a otro número de la ciudad. Pero las fibras ópticas transportan un tráfico mucho mayor: un conmutador óptico con 100 canales ópticos aferentes, cada uno de 10 gigabits por segundo, tendrá que tratar un terabit (un billón de bits) por segundo.

Hasta hace muy poco, los conmutadores ópticos no podían ni por asomo aproximarse a esa capacidad. Ya en 1992, Bell Laboratories, subsidiaria de Lucent Technologies, expuso un transconector de niobato de litio que podía recibir 16 fibras aferentes y encaminarlas a 16 fibras eferentes; más recientemente ha probado un conmutador con 48 entradas y 48 salidas. El número de canales entrada-a-salida en estos conmutadores era demasiado bajo, salvo para las aplicaciones más limitadas de redes ópticas.

El prototipo de transconector óptico que hoy consideran numerosas compañías es radicalmente diferente. Se basa en la técnica MEMS (sistemas microelectromecánicos), por la cual se construyen "micromáquinas" cada vez mejor acogidas en muchas industrias, tanto de telecomunicaciones como de automoción, aeroespaciales, electrónica de consumo y otras. En esencia, MEMS viene a ser un circuito integrado mecánico. Los procesos litográficos y de grabado son similares a los empleados en la fabricación de circuitos de integración en gran escala (LSI): dispositivos depositados y configurados en la superficie de una oblea de silicio. En la técnica MEMS, se atacan las capas de óxido para esculpir los elementos estructurales del dispositivo. Sin embargo, en lugar de crear transistores, los procesos litográficos forman dispositivos de algunas decenas o centenas de micrometros que se mueven bajo control de una señal eléctrica.

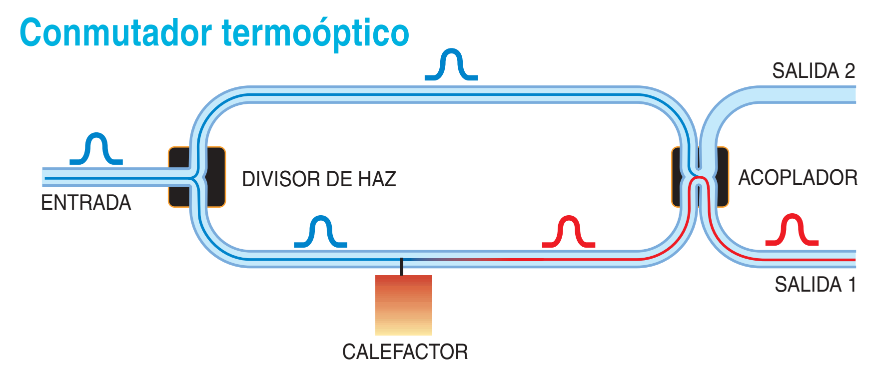
Conmutador MEMS





2. ESPEJO INCLINADO de un sistema microelectromecánico (MEMS) (*ampliado en la fotografía*), que desvía la luz procedente de una fibra aferente hacia un reflector, de ahí hacia otro espejo y luego hacia una fibra eferente.

Conmutador termoóptico



3. CONMUTADOR TERMOOPTICO, en el que se aplica calor a uno de los dos guiaondas que conducen la luz después de pasar por un divisor de haz. El aumento de temperatura alarga ligeramente el trayecto, alterando la fase de la luz. Al recombinarse los dos haces, la luz sale por la vía 1. Si no se calienta, la luz saldrá por la vía 2.

Varias empresas han elegido MEMS para construir transconectores ópticos, puesto que proporcionan dispositivos pequeños y muy económicos, capaces de incorporar circuitos de muy alto índice de integración (VLSI). Y lo que es más importante, las micromáquinas MEMS son resistentes, su vida útil es larga y admiten un elevado número de dispositivos en la oblea. Además, la técnica se adapta a las aplicaciones ópticas, puesto que permite ampliar o reconfigurar a voluntad el número de trayectos a través del conmutador.

Para encaminar una longitud de onda por un trayecto de la red, el conmutador MEMS se vale de diminutos espejos, colocados de forma tal, que cada uno de ellos esté iluminado por una o varias de las múltiples longitudes de onda que transportan un tren de información por el interior de una misma fibra. En un tipo de conmutador MEMS, los espejitos se inclinan de arriba abajo, o de un lado a otro, para que cualquiera de las longitudes de onda que llegan por las 256 fibras aferentes pueda pasar a una cualquiera de las 256 fibras eferentes.

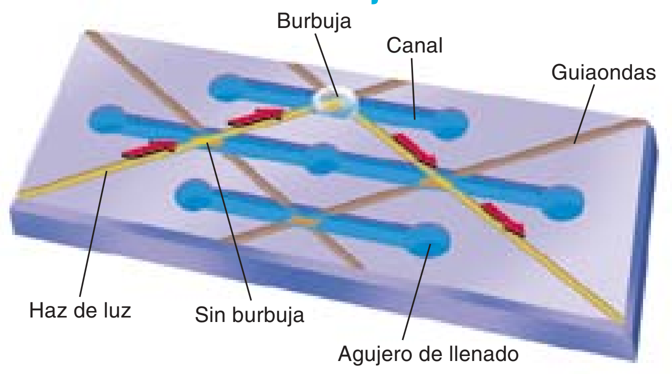
Para comprender cómo funciona el conmutador, imaginemos que nos sentamos en una habitación con muchas ventanas. Si por una ventana penetra un rayo de sol y tenemos un espejo móvil, podremos manipularlo para que ese rayo de sol se refleje y salga a través de cualquiera de las otras ventanas. En el caso de un conmutador MEMS, el tren de fotones de una cierta longitud de onda que llega por un puerto de entrada, incide sobre una serie de espejos MEMS que lo dirigen hacia uno de los numerosos puertos de salida, dependiente de la ruta que deba elegir.

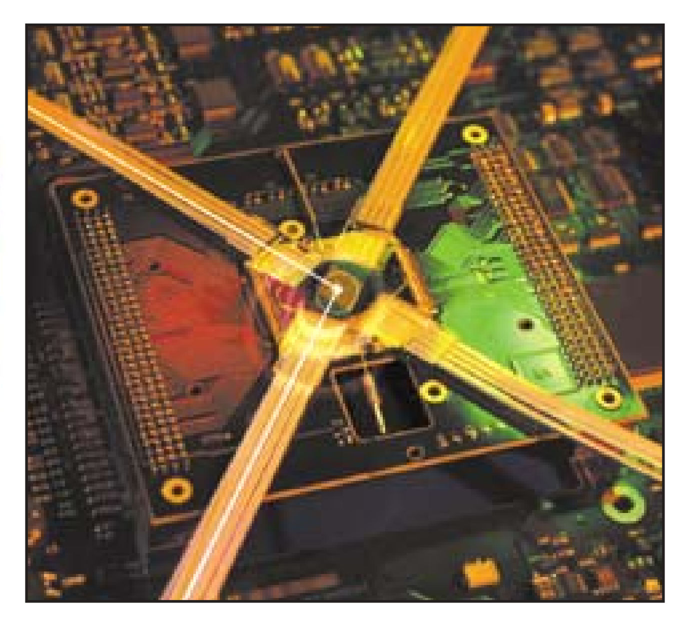
Más concretamente, la lógica del procesador de conmutación decide a dónde debe enviarse el tren de fotones entrante. Envía una señal a un electrodo de la superficie del microcircuito, y éste genera un campo eléctrico que hace inclinar los espejos. La onda luminosa entrante se filtra en longitudes de onda separadas, incidiendo cada una de ellas sobre uno de los 256 espejos de entrada inclinados. A partir de ahí se reflejan a través de otro espejo hacia los espejos de salida, que seguidamente dirigen las respectivas longitudes de onda hacia otras fibras. El proceso se completa en milisegundos, celeridad suficiente para las aplicaciones de conmutación más exigentes.

Las dimensiones de los elementos de conmutación individuales confieren un extraordinario atractivo a la técnica MEMS. Cada espejo de un conmutador MEMS tiene medio milímetro de diámetro, como la cabeza de un alfiler. La separación de los espejitos es de un milímetro; los 256 espejos están realizados sobre una pastilla de silicio cuadrada de 2,5 centímetros de lado. El conmutador entero abulta como un pomelo. El juego de espejos que constituyen el conmutador es unas 32 veces más denso que los componentes equivalentes en un conmutador electrónico. Y sin necesidad alguna de procesamiento de señal ni de conversiones optoelectrónicas, estos conmutadores reducirán a la centésima parte el consumo de energía de los conmutadores electrónicos.

Los procesos de fabricación normales de los circuitos de silicio dan un buen rendimiento económico a

Conmutador de burbuja





4. UNA BURBUJA microscópica insuflada en la unión de un conmutador Agilent provisto de cabeza impresora de chorro de tinta hace que la luz se desvíe a la derecha (*fotografía*). Si en la unión no hay burbuja, el haz seguirá su trayectoria recta. El líquido procedente de los agujeros de llenado entra en unos canales que atraviesan los puntos de unión, donde la cabeza impresora (*no mostrada*) insufla una burbuja.

Conmutador de cristal líquido

SIN TENSION
DESPLAZADOR DE HAZ
LUZ POLARIZADA
CELULA DE CRISTAL LIQUIDO
TENSION
DESPLAZADOR DE HAZ
LUZ POLARIZADA
CELULA DE CRISTAL LIQUIDO

5. CELULA de cristal líquido en un conmutador que realinea la luz de polarización oblicua en una orientación horizontal o vertical, dependiendo de que se aplique o no una tensión. Un desplazador en forma de prisma deja pasar hacia la derecha la luz polarizada verticalmente; en cambio la luz de polarización horizontal atraviesa el cristal en línea recta. La fotografía ilustra el tipo de cristal empleado.



esta técnica. Y los espejos de silicio consiguen una estabilidad mayor que los fabricados de metal. En una nueva etapa de la construcción se utiliza el proceso de autoagrupación, llamado así por el modo en que se repliegan sobre sí mismos los aminoácidos en la proteína, adoptando formas tridimensionales. En las etapas finales de la fabricación, unos diminutos resortes de la superficie del silicio liberan los espejos; cada uno de ellos se halla rodeado por un marco que lo levanta y lo fija en su posición correcta, a suficiente altura sobre la superficie para dejarle un margen de movimiento.

El diseño de la red de espejos utiliza un espejo para la entrada y otro para la salida. Esta solución entraña exigencias mecánicas muy rigurosas, ya que los espejos han de presentar diferentes ángulos de inclinación. Pero la técnica del silicio consigue unos espejos más rígidos, menos propensos a desviarse de su alineación. Y los elementos componentes se manipulan con gran precisión gracias a unos excelentes algoritmos controlados por programa lógico. Este diseño fomentará la construcción de conmutadores mucho mayores. Los anteriores conmutadores de niobato de litio requerían muchos más elementos de conmutación —un número igual al cuadrado del número de entradas o de salidas—, exigencia que haría demasiado embarazoso el diseño de un conmutador grande. Ello contrasta con la arquitectura, más sencilla, de los conmutadores MEMS.

La capacidad de construir conmutadores de esa magnitud o cuán pequeños se quiera reviste primordial interés para los operadores de telecomunicaciones, que deben ser capaces de acomodarse al acelerado crecimiento de la demanda. En julio de 2000 se presentó el primer gran conmutador MEMS, el LambdaRouter de Lucent. Ofrecía una capacidad total de conmutación superior a 10 terabits por segundo, 10 veces el tráfico que cursan los segmentos de mayor utilización de Internet. Cada uno de los 256 canales de entrada-a-salida puede aguantar velocidades de 320 gigabits por segundo, 128 veces la velocidad de los conmutadores electrónicos actuales. Por último, estos conmutadores podrían admitir sistemas del orden de petabit (10^{18} bits) por segundo, en un horizonte no muy lejano.

Más allá de MEMS

Actualmente MEMS es la técnica de conmutación óptica más investigada. Solamente en Silicon Valley se han asentado más de 10 instalaciones MEMS. Pero esta aplicación no es ni mucho menos la única. Otro terreno a investigar son los guiaondas fotónicos. A semejanza de MEMS, los conmutadores basados en guiaondas utilizan multitud de elementos sencillos para controlar la trayectoria de las ondas de luz y enviarlas a la red por distintos caminos posibles.

Los circuitos de guiaondas, asimismo procesados por el método normal de los circuitos integrados, guardan un notable parecido con las fibras ópticas. Los guías de ondas constan de dos tipos de vidrio, el núcleo y la funda, con diferente índice de refracción. Como se sabe, el índice de

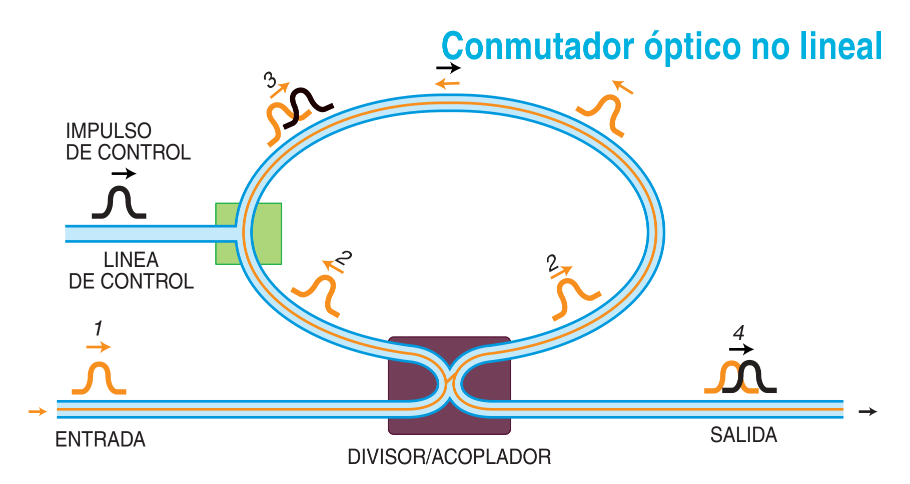
refracción de un material mide su capacidad de desviar la luz que lo atraviesa. Eligiendo adecuadamente los índices de ambos vidrios, es seguro que toda la luz se reflejará en el interior de la fibra.

Un tipo de conmutador guiaondas desarrollado por varias firmas utiliza el efecto termoóptico: un cambio de temperatura que altera la fase de una onda luminosa (la posición en el tiempo de su oscilación) y, por tanto, la ruta que recorre. En este dispositivo, el haz de luz se divide en dos trayectos separados. En uno de los haces divergentes se aplica calor mediante una resistencia eléctrica, con lo que crece ligeramente la longitud de ese trayecto y varía, en consecuencia, la fase de la onda de luz respectiva. Cuando las dos señales vuelven a converger, ese desfasaje provocará que la luz se conmute a uno de los dos puertos de salida.

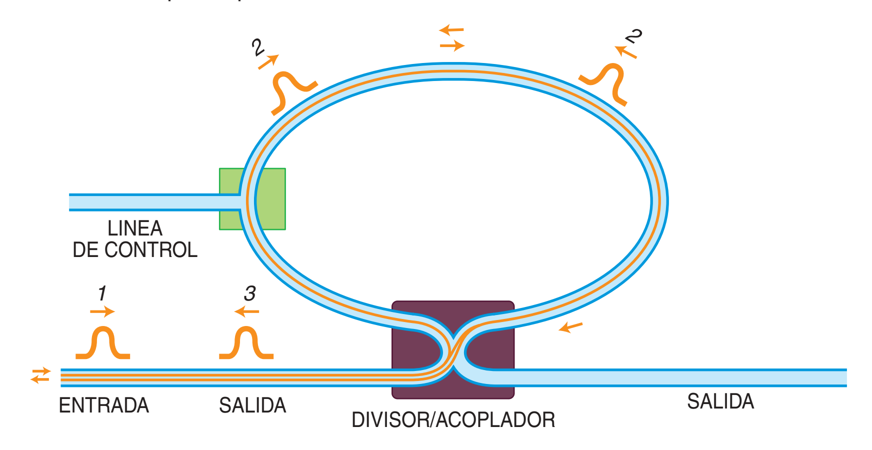
Los guiaondas pueden fabricarse en grandes lotes sobre un sustrato material común como el silicio, razón por la cual tienden a ser pequeños y económicos. Los sustratos, llamados obleas, pueden servir de plataformas para instalar láseres y detectores que permitan transmitir y recibir los impulsos ópticos representativos de bits individuales. La integración de los componentes podría conducir a circuitos fotónicos integrados, versión miniaturizada de los componentes que colman los laboratorios de física; por ese motivo la técnica de guiaondas a veces se denomina banco de pruebas óptico del silicio.

Hay un elemento de conmutación fascinante que combina los guiaondas fotónicos con la técnica del chorro de tinta de las impresoras. Aunque parezca inverosímil emplearlo como conmutador óptico, el dispositivo creado por Agilent, subsidiaria de Hewlett-Packard, empieza a convencer a los más escépticos.

Conmutador óptico no lineal



6. UN IMPULSO DE LUZ que incide en un espejo de bucle óptico (*1*) se divide en dos impulsos separados que circulan por el bucle en sentidos opuestos (*2*). Cuando entra un impulso en el bucle desde la línea de control, interactúa con el impulso de sentido dextrógiro, modificando su fase (*3*). Los impulsos que circulan en sentidos encontrados se recombinan en el divisor/acoplador; el cambio de fase del impulso reconstituido provoca la salida de un impulso por la vía de la derecha.



7. NO HAY IMPULSO DE CONTROL que modifique la salida del conmutador. Un impulso entra en el bucle (*1*), se divide en dos impulsos que circulan en sentidos opuestos (*2*), se recombinan éstos en el divisor y el impulso sale por la vía que había entrado (*3*).

Burbujas a perpetuidad

El conmutador consiste en un guiaondas de sílice en el que unos grupos de haces de luz se cortan y forman una malla. En la intersección de estos haces se sitúa un diminuto orificio, lleno de un fluido con el mismo índice de refracción que la sílice. Una cabeza impresora de chorro de tinta colocada debajo puede insuflar una burbuja en el agujero, haciendo que la luz se desvíe y pase a otro guiaondas. En ausencia de burbuja, la luz seguirá el camino recto.

Que este conmutador pueda funcionar da fe del extraordinario ingenio técnico que hay detrás de las impresoras de chorro de tinta (*véase la figura 4*).

En el conmutador de burbuja se combinan el tamaño reducido, la velocidad de conmutación razonable y una buena calidad óptica. Como en muchos otros diseños, sin embargo, puede haber dificultades para construir conmutadores grandes. Un conmutador con sólo 10 entradas y 10 salidas necesitará 100 cabezas impresoras para llenar y vaciar de fluido los orificios. Si el número de puertos de conmutación es pequeño, el diseño resultará viable, mas no así para los conmutadores con miles de puertos que imaginan los ingenieros de redes.

Hay, sin embargo, otro tipo de conmutador que aprovecha las propiedades electroópticas de los cristales líquidos, tan utilizados en relojes digitales y pantallas de calculadoras. Los cristales líquidos se componen de moléculas unidimensionales, que cambian su orientación al interactuar con campos eléctricos aplicados desde el exterior. Esta característica los hace idóneos para la conmutación óptica.

Cuando se aplica un campo eléctrico intenso a los delgados cristales, éstos se orientan en una dirección determinada. El cambio de orientación modifica la polarización de la luz que atraviesa los cristales; otros componentes del conmutador solamente dejan pasar la luz de una polarización hacia la fibra eferente deseada.

El cristal líquido reside en una célula intercalada entre dos láminas de vidrio revestidas de un óxido conductor transparente, que actúan como electrodos. Al aplicar una tensión entre los electrodos se crea un campo eléctrico que modifica la orientación de las moléculas de cristal líquido y, por tanto, la polarización de la luz que pasa a través de la célula. La luz atraviesa luego un desplazador, cristal compuesto que dirige la luz a un determinado puerto de salida, en función de su polarización (*véase la figura 5*).

Históricamente, ha pesado sobre los componentes de cristal líquido su lentitud de conmutación y deficiente comportamiento óptico. En efecto, un ligerísimo cambio del ángulo de polarización de la luz afectaba a las prestaciones. Ultimamente se han reducido estos efectos al mínimo, y compañías como Corning y Chorum Technologies mantienen intensos programas de desarrollo. Con todo, igual que sucede con otros sistemas de diseño, la ingeniería y construcción de grandes conmutadores tal vez resulte difícil, puesto que el número de elementos de conmutación crece en proporción al cuadrado del número de entradas o de salidas. Sin embargo, esta técnica podría servir muy bien para construir un multiplexor reconfigurable, dispositivo análogo al conmutador que permite inyectar longitudes de onda en una red óptica o extraerlas de la misma.

Existe otro tipo de conmutador óptico en el que se aprovecha el cambio que experimenta el índice de refracción del vidrio al variar la intensidad de la luz. Los fenómenos ópticos que conocemos en nuestra vida diaria son, en su mayoría, lineales. Si se dirige una luz más intensa al espejo, éste reflejará más luz; la imagen parecerá más brillante. Un efecto óptico no lineal, sin embargo, cambiará las propiedades del material que atraviesa la luz. Imaginemos que el espejo se volviera transparente al iluminarlo.

Las fibras ópticas de vidrio presentan efectos no lineales, algunos de los cuales pueden aprovecharse para diseñar elementos de conmutación muy rápidos, capaces de cambiar su estado en cuestión de femtosegundos (10^{-15} segundos). Consideremos ahora un espejo con bucle óptico no lineal, un tipo de interferómetro en el que interactúan dos haces luminosos.

En este espejo, el haz entrante pasa por un divisor de fibra y se divide en dos. En uno de los casos, los haces parciales recorren el bucle en sentidos opuestos y se recombinan tras completar el círculo, saliendo por la misma fibra de llegada. Pero en otros casos, después de la división del haz, se inyecta un haz adicional en un solo sentido de circulación del bucle. La intensidad de la luz producida por la interacción de los haces coincidentes modifica el índice de refracción de la fibra, y esto a su vez varía la fase del haz luminoso. La señal recombinada, que ya ha alterado su fase, sale por una fibra distinta (*véase la figura 6*).

En general, la conmutación óptica no lineal exige utilizar impulsos ópticos muy breves, que contengan potencia suficiente para provocar efectos no lineales en el vidrio de la fibra. Es posible, empero, incorporar al conmutador un amplificador óptico que reduzca el umbral al que se producen los efectos no lineales. Si bien los conmutadores no lineales todavía no han alcanzado desarrollo comercial, esa técnica abre expectativas en el futuro.

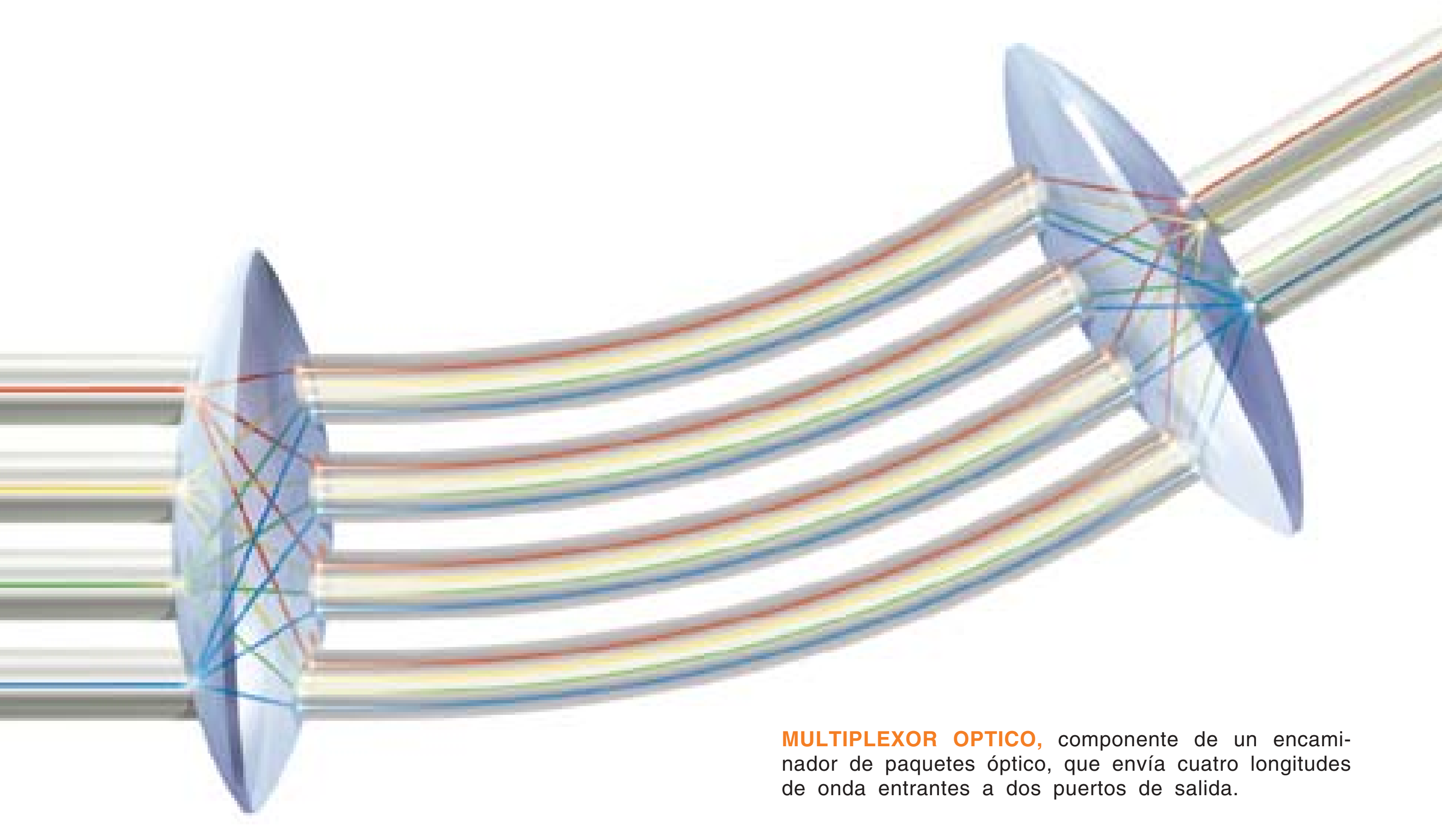
Dado el vigoroso interés actual por el desarrollo de nuevos materiales y procesos para la conmutación de haces de luz, el dominio del electrón en las telecomunicaciones se está acercando al ocaso. Los nuevos materiales y sistemas permiten abrigar esperanzas de un rápido progreso en la conmutación óptica; se ha comenzado a explorar incluso los hologramas o materiales acústicos como elementos de conmutación. El motivo que anima estas diversas investigaciones es la total eliminación de la congestión, de origen electrónico, creada en las redes ópticas de gran capacidad. Se realizará así el sueño de los proveedores de servicios de telecomunicación: redes de enorme capacidad con abundancia ilimitada de anchura de banda.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

OPTICAL FIBER TELECOMMUNICATIONS IIIB. Preparado por Ivan P. Kaminow y Thomas L. Koch. Academic Press, 1997.

UNDERSTANDING FIBER OPTICS. Jeff Hecht. Pfrentice Hall, 1998.

BELL LABS TECHNICAL JOURNAL. Diversos artículos sobre el futuro de las comunicaciones ópticas. vol. 5, n.º 1; enero-marzo 2000.



MULTIPLEXOR OPTICO, componente de un encaminador de paquetes óptico, que envía cuatro longitudes de onda entrantes a dos puertos de salida.

Los ingenieros de redes han empezado a construir la Internet óptica con técnicas de conmutación capaces de dirigir una parte o el total de las señales luminosas llegadas por fibra óptica a una o varias fibras ópticas de salida. La Internet óptica de la nueva generación servirá como vehículo de distribución de correo de alta velocidad, transportando las unidades de datos, los paquetes, hasta un punto cercano al destinatario. A partir de ahí, los encaminadores electrónicos se encargarán del proceso —más lento— de clasificar los paquetes por destinos, lo equivalente en Internet a la oficina de correos local. Al cabo del tiempo, incluso esta tarea de conmutación de paquetes individuales podrá ser asumida por encaminadores de procesamiento fotónico, no electrónico.

El paquete IP es la moneda básica de Internet. En las redes actuales, cada mensaje de correo electrónico se trocea en miles de paquetes, conmutados a diferentes trayectos y recompuestos en su destino mediante el protocolo de Internet (IP). Los encaminadores, unidos a otros equipos de red, convierten en señales electrónicas los datos contenidos en las ondas de luz, a fin de poder leer los paquetes y enviarlos hacia su destino postrero: un servidor de correo donde se recombinan en un mensaje coherente, tras lo cual una voz sintetizada anuncia "¡Ha llegado correo!" La clave está en que los encaminadores de todo el trayecto puedan leer fácilmente la dirección de cada paquete IP.

La red de ondas ópticas que hoy asume la carga más pesada tal vez representa sólo una etapa de la evolución hacia una red enteramente óptica. Cuando por las redes circulen habitualmente terabits (billones de bits) por segundo, el paso de conversión a la electrónica puede costar demasiado en tiempo y dinero. En los años venideros, será corriente que un encaminador descomponga un tren de datos que transporta 40 gigabits (mil millones de bits) por segundo en una sola longitud de onda, en 16 trenes de datos electrónicos en paralelo, transmitiendo cada uno 2,5 gigabits por segundo dentro del encaminador. El trasiego de un enorme número de paquetes por segundo entre las múltiples capas de la electrónica del encaminador tiende a crear congestión y degradar la calidad funcional de la red.

De luz a luz

En respuesta a estos problemas, los expertos en ingeniería de redes contemplan una solución que utilizará ondas de luz para procesar ondas de luz y conmutadores ópticos capaces de redirigir paquetes a velocidades cegadoras. La técnica de encaminamiento por fotónica está todavía en pañales. La creación de una red fotónica de conmutación de paquetes exigirá superar multitud de barreras técnicas comparables a las que afrontaron los técnicos electrónicos desde mediados de los años cincuenta hasta mediados de los setenta, pasando de resistencias y condensadores individuales, soldados en una placa de circuito, a los circuitos integrados monolíticos.

No obstante, la carrera ha comenzado. La Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada para la Defensa (DARPA) ha financiado programas de conmutación óptica de paquetes en la Universidad de California en Santa Bárbara, Telcordia Technologies en Morriston (New Jersey), la Universidad de Princeton y la Universidad de Stanford. Alcatel en Francia, la Universidad Técnica de Dinamarca y la Universidad Strathclyde en Escocia han acometido igualmente trabajos de investigación.

Como posible técnica para la conmutación fotónica de paquetes en las redes futuras, aparece la que se de-

PAQUETES GUIADOS POR LA LUZ

Para conseguir una red enteramente óptica habrá que esperar avances espectaculares en las técnicas de transferencia de información de una onda luminosa a otra

Daniel J. Blumenthal

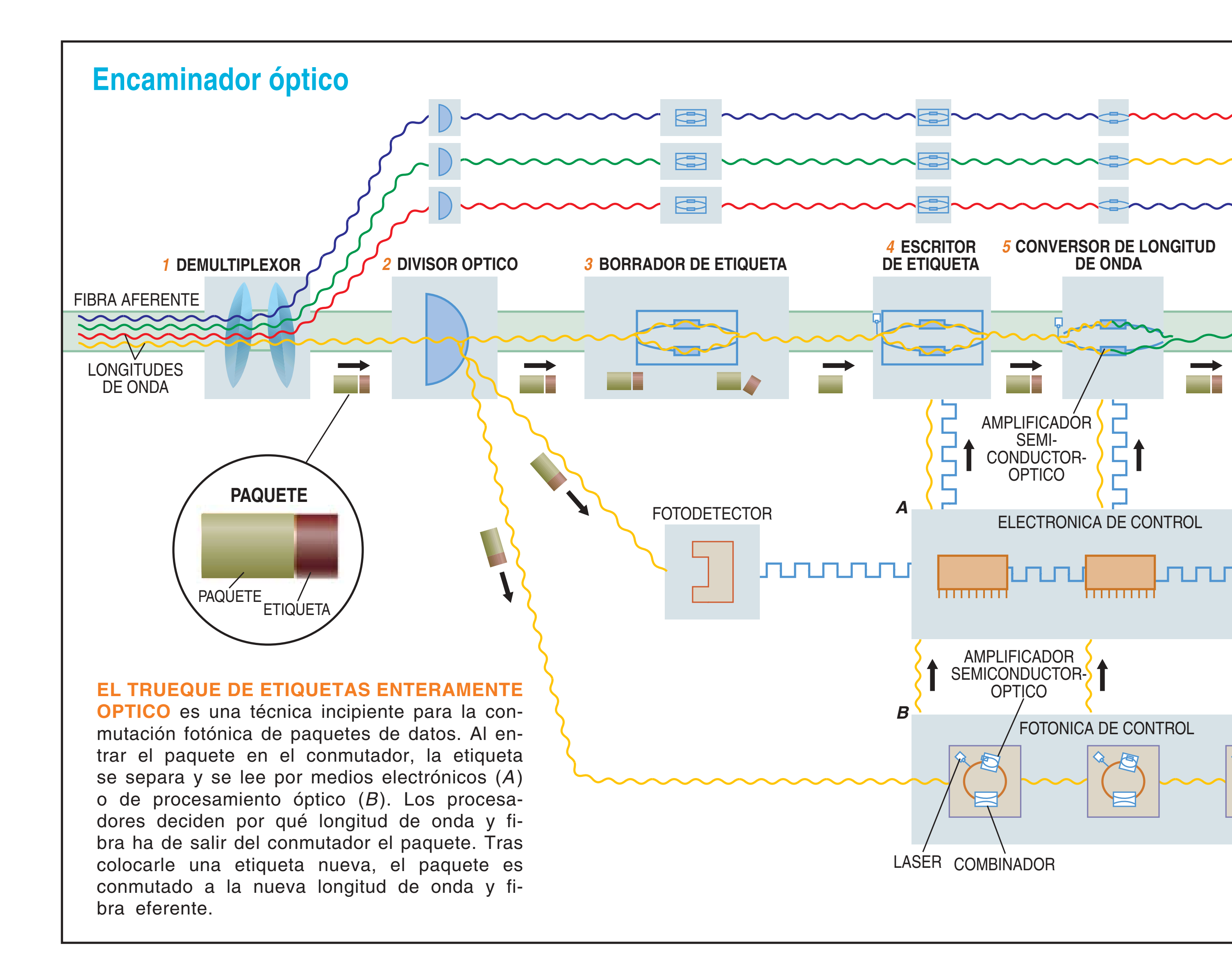
nomina "trueque de etiquetas totalmente óptico" (AOLS, All-Optical Label Swapping). En AOLS, los paquetes IP individuales o en grupo se rotulan con una etiqueta óptica. El paquete IP es como un sobre con una dirección delante (el encabezamiento) y un contenido interior (cabida útil). AOLS agrega una etiqueta al paquete, colocada por ejemplo delante del encabezamiento. El empleo de etiquetas se asemeja a introducir en una misma saca de correo todas las cartas que pasan por una serie de ciudades importantes hacia su destino final. En cada punto intermedio de la ruta los funcionarios de Correos leen sólo la etiqueta, no cada sobre.

En una red de comunicaciones, el encaminador óptico examinará la etiqueta más pequeña y determinará a qué fibra o longitud de onda de salida ha de enviar el paquete, sin leer el encabezamiento que va dentro del paquete. No se trata de una tarea fácil con las técnicas fotónicas actuales. Los componentes ópticos que desempeñan la función de elementos de circuito integrado capaces de leer y procesar una etiqueta, apenas han pasado de la fase de laboratorio y no han llegado a entrar en las grandes vías comerciales.

Tomemos un ejemplo tan sencillo como las memorias tampón (*buffers*) utilizadas para almacenamiento temporal de los bits de un paquete. Al diseñar un encaminador electrónico, lo normal sería retener el paquete en una de estas memorias, semejante a la memoria de acceso aleatorio dinámica (DRAM) de los ordenadores. Pero no es fácil almacenar fotones. Por ello hay que imaginar maneras de almacenar temporalmente un paquete en complejos circuitos ópticos, donde los fotones no se quedan quietos, sino que los impulsos luminosos se confinan en una zona de retención. Otros métodos utilizan técnicas que se ajustan al tiempo que tardan los impulsos de un paquete en atravesar el conmutador. Para conseguirlo, se envían los impulsos a través de una fibra de longitud predeterminada, de tal manera que el tiempo consumido en atravesar esta fibra de "rodeo" sea igual al tiempo que necesita el conmutador para extraer la etiqueta del paquete y leer la información de encaminamiento que contiene.

Las memorias tampón ópticas que circulan por los laboratorios son cientos de veces mayores que sus homólogas electrónicas, cuyas dimensiones son del orden de los submicrometros. Se ignora si alguna vez llegará a realizarse una versión óptica de la densa aglomeración de transistores del microprocesador Pentium.

Además de memorias tampón, también se han probado, en el laboratorio, circuitos lógicos capaces de procesar etiquetas mediante el control de luz por la luz, pero distan mucho de poderse realizar en un encaminador a escala real. Por esta razón, los primeros ejemplos de encaminadores fotónicos todavía recurrirán a la electrónica. A todo paquete que entre en un encaminador AOLS de la primera generación se le derivará una pequeña parte de su energía óptica por una trayectoria separada, en la que un fotodetector obtendrá una copia electrónica del paquete y la etiqueta. La etiqueta se llevará a unos circuitos que leerán su contenido y calcularán el siguiente trayecto que habrá de recorrer el paquete en la red. El procesador electrónico generará una nueva etiqueta, la incorporará al paquete original y enviará una señal de control al conmutador para especificar una longitud de onda o una fibra concreta por la cual deba transmitirse el paquete (*véase el recuadro*). Pese a la necesidad de someter a conversión optoelectrónica la minúscula etiqueta, quizá de 20 bits, los conmutadores ópticos evitarán así el procesamiento electrónico del paquete, mucho más voluminoso, que podría variar desde 40 hasta miles de bytes. El paquete grande atravesará el conmutador a la superior velocidad de la comunicación óptica. Realizar la conversión para el pa-



EL TRUEQUE DE ETIQUETAS ENTERAMENTE OPTICO es una técnica incipiente para la conmutación fotónica de paquetes de datos. Al entrar el paquete en el conmutador, la etiqueta se separa y se lee por medios electrónicos (*A*) o de procesamiento óptico (*B*). Los procesadores deciden por qué longitud de onda y fibra ha de salir del conmutador el paquete. Tras colocarle una etiqueta nueva, el paquete es conmutado a la nueva longitud de onda y fibra eferente.

quete entero importaría un coste prohibitivo, además de consumir energía y espacio para el equipo electrónico.

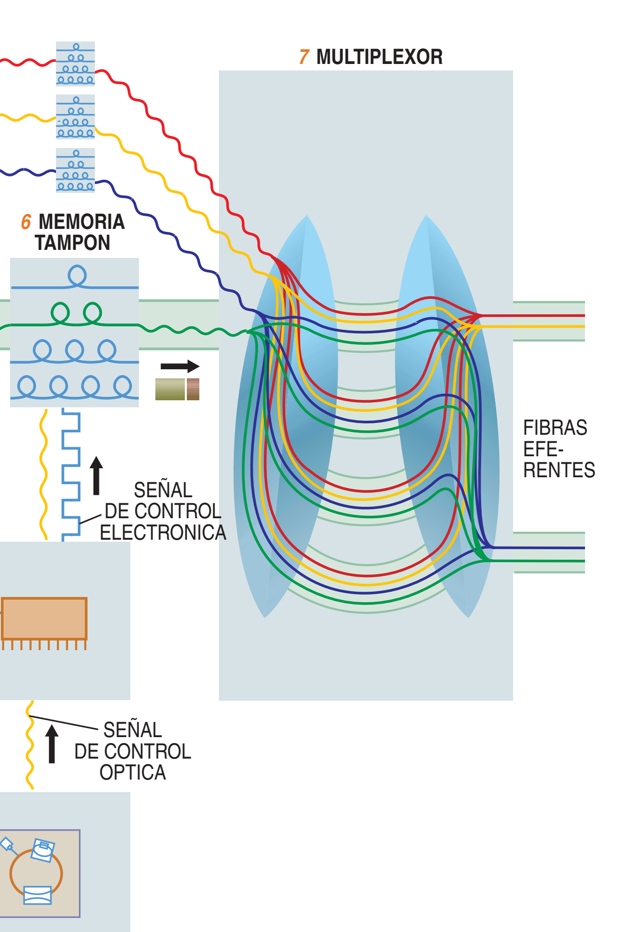
Una vez procesada la etiqueta, el paquete llegará a los elementos físicos que lo conmutarán desde la fibra aferente hacia la eferente. Los elementos de conmutación óptica plantean otro reto importante a la ingeniería, dado que han de enviar un paquete a una nueva fibra en no más de un nanosegundo. Han aparecido varias técnicas que conmutan paquetes a las velocidades deseadas. Un ejemplo es el amplificador semiconductor-óptico, dispositivo que utiliza la emisión de luz estimulada como base de la conmutación, proceso idéntico al de excitación del láser.

Para conmutar una señal de una fibra aferente en cualquiera de las numerosas fibras eferentes, el amplificador tiende un puente óptico entre las fibras aferentes y eferentes deseadas. Cuando llega al puente una señal óptica que transporta datos, una corriente eléctrica contenida en una señal de control inyecta en el amplificador electrones y "huecos" (áreas de ausencia de electrones). La luz que entra en el amplificador provoca la mutua combinación de electrones y huecos, desprendiéndose más fotones que son copias exactas de la señal óptica que intenta cruzar el puente. En cuanto la señal alcanza cierto nivel de energía, se traslada de un lado a otro del puente. Cuando se desactiva la corriente de control, la luz presente a la entrada del amplificador es absorbida y no logra pasar a la fibra de salida. Aunque la señal de control que abre la pasarela es electrónica, el torrente de fotones portadores de paquetes corre a través del conmutador sin ser convertido a señal electrónica.

La técnica se halla en sus primeros pasos de desarrollo. Se han diseñado conmutadores rápidos de ocho a diez fibras aferentes y eferentes, pero los productos comerciales necesitarán conmutadores con cientos o miles de puertos de entrada y salida.

Los amplificadores semiconductor-ópticos también pueden desempeñar un papel crucial en la elaboración de una técnica capaz de transferir un tren de bits directamente de una onda luminosa a otra. Este conversor de longitud de onda puede conmutar paquetes a múltiples fibras de salida, combinando esta técnica con un dis-

DANIEL J. BLUMENTHAL es cofundador de Calient Networks, en la californiana San José, que fabrica conmutadores ópticos basados en dispositivos microelectromecánicos. Da clases en el departamento de ingeniería eléctrica e informática de la Universidad de California en Santa Bárbara.



1 Los datos recibidos por una fibra aferente se separan, de acuerdo con sus longitudes de onda (demultiplexados), en diferentes trayectos dentro del encaminador.

2 Un divisor óptico crea una copia del paquete y la envía a un módulo de control, que puede ser electrónico (*A*) o fotónico (*B*). El módulo de control lee sólo la etiqueta y prescinde del resto del paquete.

3 La otra copia del paquete va a un dispositivo borrador que suprime la etiqueta.

4 Un dispositivo escritor apunta una nueva etiqueta al recibir una señal de los módulos de control, indicando el siguiente destino a donde ha de enviarse el paquete.

5 Otra señal procedente de los módulos de control dirige el conversor de longitud de onda para trasladar un paquete de una longitud de onda a otra. (Ocurre lo mismo para paquetes canalizados por las longitudes de onda entrantes de azul, verde y rojo.)

6 Una memoria tampón óptica retiene el paquete hasta que el módulo de control ordene enviarlo a través de un multiplexor.

7 Un multiplexor dirige las longitudes de onda portadoras de paquetes a una de las fibras de salida.

positivo multiplexor de longitudes de onda que, a semejanza del prisma, descompone la luz en sus colores individuales. El conversor de longitud de onda determinará cómo encaminar los paquetes para evitar conflictos de conmutación. Si dos paquetes en diferentes fibras necesitan transferirse en la longitud de onda del rojo a una fibra eferente dada, el conversor de longitud de onda dirigirá uno de los paquetes a una longitud de onda del verde para garantizar que no se produzca un conflicto.

Interacción entre longitudes de onda

En los conversores experimentales se ha aplicado la técnica del circuito integrado fotónico (PIC, *photonic integrated-circuit*), equivalente en óptica a la integración de componentes electrónicos en microcircuitos. En estos conversores PIC la luz procedente de un láser se propaga por guiaondas semejantes a fibras ópticas. Ciertos tipos de procesamiento óptico aprovechan la interacción de una longitud de onda portadora de un tren de bits con otra longitud de onda, pasando la información a esta última. La transferencia de luz a luz se produce cuando el tren de bits óptico hace que el guiaondas cambie la fase de la longitud de onda receptora, la cual sale luego por una fibra de salida. Un cambio de la fase podría significar un "uno" digital; la ausencia de cambio, un "cero".

Con miras a la viabilidad de los conversores, se ha trabajado en el desarrollo de láseres sintonizables, capaces de ajustarse a diferentes longitudes de onda en las que puedan modularse los bits de los paquetes entrantes. Los láseres probados en el laboratorio permiten conmutar un tren de datos entrante a una cualquiera de 80 longitudes de onda, número que en el futuro crecerá hasta las centenas.

En último término, las propias decisiones de encaminamiento del paquete deberán necesariamente tomarse en el terreno óptico. Un paquete que circula a más de 160 gigabits por segundo en cierta longitud de onda sólo tardará un nanosegundo en atravesar el conmutador, mientras que se invertirán 100 nanosegundos en procesar una etiqueta por medios electrónicos. En esencia, la etiqueta de dirección se habrá hecho mayor que el sobre (paquete) en el que va pegada. Hacer que la etiqueta recorra el procesador a mayor velocidad —hasta más de 100 gigabits por segundo— tal vez forzaría los límites de los circuitos electrónicos de control (aunque ya se están experimentando técnicas electrónicas nuevas y exóticas que podrían funcionar a esas velocidades).

Algunos, anticipándose a este problema, han ideado unos prototipos de puertas lógicas ópticas de velocidad ultraelevada, construidos con la misma técnica que los conmutadores controlados por luz. Estos dispositivos —desarrollados en Princeton, en el MIT y en British Telecom, entre otros— utilizan diferentes configuraciones de amplificadores semiconductor-ópticos u otros materiales ópticos para realizar unas sencillas puertas lógicas booleanas (AND, XOR y NOT) capaces de procesar señales de luz que viajan a velocidades superiores a los 250 gigabits por segundo.

Las decisiones de encaminamiento de paquetes que toman estas puertas en el laboratorio son extremadamente sencillas, y no pueden todavía trasladarse a la escala que requiere la complejidad de un conmutador comercial. No obstante, la integración de los dispositivos y las nuevas técnicas de conmutación óptica pueden tornar posible algún día el control fotónico, lo que marcará la verdadera aparición de un encaminador puramente óptico. Si todo esto llega a resolverse, un paquete podrá viajar desde Gerona hasta Cádiz a través de encaminadores IP, sin tocar en absoluto la electrónica.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

OPTICAL NETWORKING SOLUTIONS FOR NEXT-GENERATION INTERNET NETWORKS. Marco Listanti y Roberto Sabella en *IEEE Communications Interactive*; septiembre de 2000.

Proteosomas

Compete a los proteosomas reciclar las proteínas celulares. Pero si cumplen mal su cometido, por exceso o por defecto, aparecen diversas enfermedades habituales

Alfred L. Goldberg, Stephen J. Elledge y J. Wade Harper

Cada minuto se reproducen en el interior de nuestras células escenas que parecerían tomadas de una película de aventuras. La "infeliz" proteína que ahora cumple su función, dentro de un instante portará el marchamo de su destino "desventurado": una suerte de túnel donde se romperá en pedazos. Es el túnel, si se nos permite seguir con la metáfora, la viva imagen del potro de castigo. En su rueda, la proteína sufre un estiramiento y sobre ella caen los cuchillos de las enzimas que la despedazan. Todavía les aguarda a los trozos del despiece, fuera ya del túnel, la acción sajadora de otras enzimas más simples que culminarán la destrucción de la proteína.

Podría pensarse que esta hipérbole intracelular carece de interés, salvo para la proteína en cuestión. Nada más lejos de la verdad. En muchos laboratorios, el nuestro incluido, se ve con claridad creciente que los proteosomas, nombre técnico de esas salas de despiece molecular, intervienen de una forma decisiva en las vías que regulan una gavilla entera de procesos celulares. Hay, en una célula normal del organismo, unos 30.000 proteosomas. Cuando fracasan en su misión —bien sea porque destruyen proteínas importantes o bien sea porque no degradan las dañadas o malformadas— pueden aparecer enfermedades. El virus de la inmunodeficiencia humana (VIH) y otros han desarrollado mecanismos para manipular la degradación proteosómica de proteínas en su propio interés. Se espera que los fármacos del futuro destinados a remediar el cáncer y otras patologías similares consistan en compuestos químicos que actúen sobre los proteosomas y las vías que transportan las proteínas hacia el interior de éstos. En ciertos laboratorios farmacéuticos se investigan compuestos inhibidores de la vía del proteosoma; hay dos fármacos en fase de prueba en el hombre.

La renovación es el camino

Del paño de las proteínas están hechas las células. Algunas proteínas actúan también como enzimas, que dirigen las reacciones de la vida. Los tipos de proteínas que una célula produce dependen de los genes que se hallen activos en cualquier momento. Determinan éstos la secuencia en que deben unirse las 20 subunidades básicas, los aminoácidos. Las cadenas se pliegan en hélices y bucles compactos para constituir diferentes clases de proteínas, dotada cada una de una función específica que le viene impuesta por su forma y su composición química.

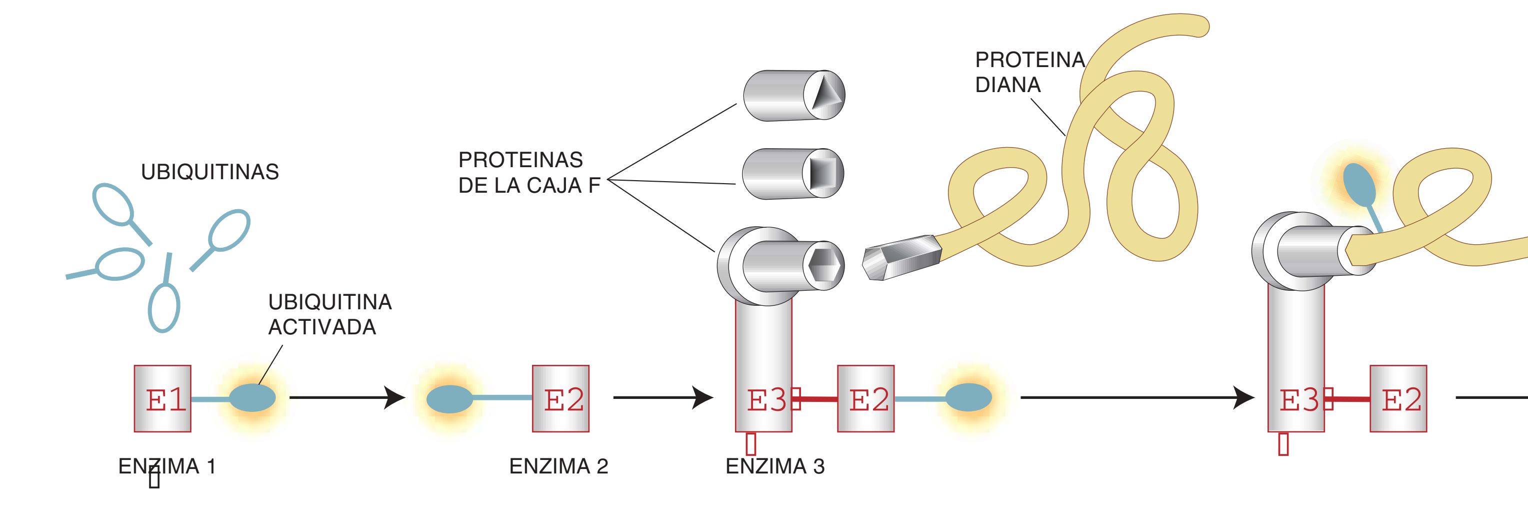
¿Qué ocurre cuando deja de necesitarse la presencia de esa proteína? Durante años se dio por supuesto que la parte del león de la degradación de las proteínas se la llevaban los lisosomas, sacos de enzimas digestivas habituales en la mayoría de las células del organismo. Pero a comienzos de los años setenta uno de los autores (Goldberg) demostró que las bacterias y los hematíes inmaduros, células privadas de lisosomas, podían, no obstante, destruir proteínas anómalas. Y más aún, el proceso requería energía, lo que no acontecía con otros procesos de degradación.

El equipo de Goldberg consiguió que ese proceso de degradación dependiente de energía funcionase en el tubo de ensayo. Merced a ello, varios grupos de investigación descubrirían, a finales de los años setenta y a lo largo del decenio siguiente, las enzimas responsables. Por último, en 1988, dos grupos — dirigido uno por Goldberg y el otro por Martin C. Rechsteiner, de la Universidad de Utah— observaron que de la degradación de las proteínas se encargaban grandes complejos multienzimáticos. A esas macroestructuras el grupo de Goldberg les dio el nombre de proteosomas.

Se les llamó así porque contienen muchas proteasas, enzimas que trocean las proteínas. Pero los proteosomas centuplican el tamaño de otras proteasas y revisten mayor complejidad. Una vez colocada una proteína en el umbral de un proteosoma, penetra en el interior de la partícula y allí se descompone en los aminoácidos que la constituían, piezas que podrán luego aprovecharse para la síntesis de nuevas proteínas. La mayoría de las proteínas se renuevan al cabo de unos días, incluso en las células que raramente se dividen, como hepatocitos o neuronas. Según de qué proteína hablemos, así será su ritmo de degradación: unas tienen pe-

1. UN PROTEOSOMA atrae hacia su interior una proteína (*estructura en forma de cinta*). La destruirá con seis enzimas específicas, simbolizadas en las cuchillas. Una célula del organismo aloja millares de proteosomas, que desguazan las proteínas que la célula desea degradar hasta trozos de tamaño variable. Los fragmentos sufren cortes ulteriores por otras enzimas, hasta dejarlos en aminoácidos, que se aprovecharán en la síntesis de nuevas proteínas.





ríodos de semivida de sólo 20 minutos, mientras que otras, en la misma célula, pueden subsistir días o semanas. Pero esas tasas de degradación varían de forma drástica a tenor de las condiciones cambiantes de nuestro cuerpo.

A primera vista, la destrucción continua de los constituyentes de la célula parece un derroche; presta, sin embargo, un servicio inestimable a numerosas funciones esenciales. La degradación de una enzima importante o una proteína reguladora, por ejemplo, es un mecanismo habitual que las células utilizan para frenar o suspender una reacción bioquímica. Por otra parte, muchos procesos celulares se activan con la degradación de una proteína inhibidora clave, igual que el agua fluye de una bañera cuando se levanta el tapón. Esta eliminación de proteínas reguladoras reviste particular interés en la temporización de las transiciones entre las etapas del ciclo de la división celular.

La degradación de proteínas desempeña un papel crucial en la regulación general del metabolismo corporal. En un momento de menesterosidad, pensemos en el estado de desnutrición o de enfermedad, la vía de los proteosomas se aviva en nuestros músculos, proporcionando aminoácidos que pueden convertirse en glucosa requerida para la combustión energética. Se refleja esa degradación excesiva de proteínas en el desgaste y debilidad muscular de los famélicos y en los pacientes con cáncer avanzado, sidosos y diabéticos sin tratar.

Nuestro sistema inmunitario, en su constante búsqueda de células infectadas con virus o cancerosas que eliminar, depende también de los proteosomas para generar las señales que identifiquen a tales células dañinas. En efecto, aunque suelen degradarse las proteínas celulares hasta dejarlas en sus aminoácidos, los proteosomas dejan sueltos unos pocos fragmentos, de entre ocho y diez aminoácidos, que son capturados y presentados en la superficie de la célula, donde el sistema inmunitario comprueba si son normales o anormales. En estados patológicos y en el bazo y los ganglios linfáticos se producen inmunoproteosomas, tipos de proteosomas especializados que potencian la eficacia de este mecanismo de vigilancia.

Gracias a la degradación de las proteínas por los proteosomas se evita la acumulación de proteínas aberrantes, potencialmente tóxicas. Las células de mamíferos y las bacterianas destruyen de una manera selectiva las proteínas que muestran conformaciones anómalas causadas por una mutación, por errores en la síntesis o por alteraciones de otra clase.

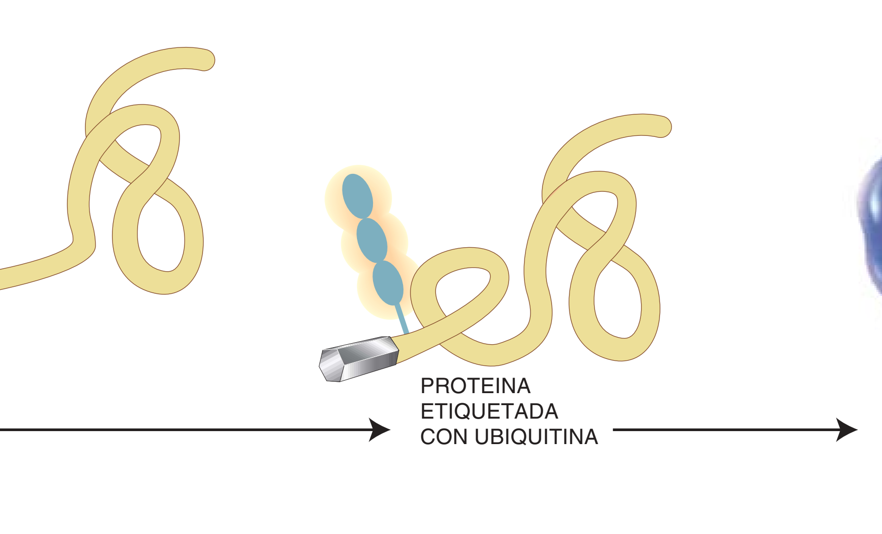
En múltiples enfermedades genéticas humanas se deja sentir la importancia de la degradación de proteínas anómalas. En varias anemias hereditarias, un gen mutante determina la síntesis de moléculas anormales de hemoglobina, que no se pliegan adecuadamente y las destruyen los proteosomas inmediatamente después de la síntesis. Por su parte, la fibrosis quística está causada por una mutación en el gen que cifra una proteína en forma de poro, que traslada el cloruro a través de la membrana externa de la célula. Debido a que estos mutantes de los transportadores de cloruro desarrollan a menudo una conformación inadecuada, los proteosomas los degradan antes de que alcancen la membrana celular. El moco pegajoso que se acumula en los pulmones y en otros órganos de las personas con fibrosis quística obedece a la falta de transportadores de cloruro normales.

Otras enfermedades podrían ser, en parte, resultado de un fracaso de los proteosomas en su función degradadora de proteínas anómalas. Hay conjuntos de proteínas mal plegadas que se acumulan junto con proteosomas en determinadas neuronas del cerebro de sujetos con la enfermedad de Parkinson, la de Huntington o la de Alzheimer. Averiguar por qué las neuronas de individuos afectados con estos trastornos neurodegenerativos dejan de degradar las proteínas anormales constituye hoy un campo de intensa investigación.

En la panza de la bestia

Desde la perspectiva de la proteína, los proteosomas son estructuras gigantes. Mientras que una proteína de tamaño medio tiene entre 40.000 y 80.000 daltons, la mayoría de los proteosomas de los organismos superiores pesan de largo dos millones de daltons. A mediados de los años noventa, un grupo dirigido por Wolfgang Baumeister y Robert Huber, del Instituto Max Planck de Bioquímica en Martinsried, recurrió al microscopio electrónico y a la técnica de la difracción de rayos X para determinar la arquitectura molecular de los proteosomas. Cada uno de ellos está constituido por una partícula central con aspecto de túnel a la que acompañan una o dos partí-

ALFRED L. GOLDBERG, STEPHEN J. ELLEDGE y J. WADE HARPER se dedican al estudio de la degradación de proteínas y su relación con la enfermedad. Goldberg es profesor de biología celular en la Facultad de Medicina de Harvard, donde ha transcurrido la mayor parte de su vida académica. Elledge ocupa la cátedra Robert A. Welch de bioquímica en Baylor, donde Harper enseña biofísica y fisiología molecular.



2. EL PROCESO DE ETIQUETADO de una proteína para su degradación en el proteosoma requiere tres enzimas que actúan de forma coordinada. La primera enzima (E1) se une y activa una molécula de ubiquitina y la entrega a la segunda enzima (E2), que a su vez la unce a una tercera enzima (E3). Las enzimas E3 son como enchufes múltiples en que pueden encajar diversas proteínas diana; los enchufes de anclaje son proteínas de la caja F. Cuando una E3 se une a una proteína, la molécula de ubiquitina transportada por la E2 se desprende de ésta y se transfiere a la proteína. El ciclo se repite hasta que la proteína queda etiquetada con una cadena de ubiquitinas. Esta cadena se une al proteosoma, que permite a las enzimas próximas a la entrada del proteosoma desplegar la proteína y empujarla hacia la cámara del proteosoma, donde otras enzimas la despedazarán.

culas reguladoras, menores, situadas en un extremo o en ambos. La partícula central consta de cuatro anillos apilados —cada uno compuesto a su vez por siete subunidades— que rodean un canal central, que constituye el tracto digestivo del proteosoma. Los dos anillos externos actúan como puertas de control y alejan así el peligro de que alguna proteína extraviada penetre en la cámara de destrucción.

A su vez, las partículas de los extremos se comportan como guardianas exigentes del paso hacia la partícula central. Son partículas reguladoras que reconocen y se unen a proteínas marcadas para la destrucción; luego, recurren a la energía necesaria para desplegar las proteínas y arrojarlas hacia la partícula central, donde se trocean en fragmentos de tamaño variable.

Se han sintetizado y aislado compuestos que inhiben de una manera selectiva el proteosoma sin afectar otras enzimas celulares, lo que podría comportar efectos secundarios. A través de tales inhibidores se nos ha venido revelando la complejidad de la vía proteosómica. A dosis elevadas, los inhibidores acaban produciendo la muerte de las células, lo que no debe sorprendernos si consideramos las importantes funciones desempeñadas por los proteosomas. No podemos omitir que, *in vivo* e *in vitro*, las células cancerosas parecen más sensibles a esos efectos letales que las células normales. Los laboratorios Millennium Pharmaceutical están ensayando un inhibidor experimental del proteosoma cuya acción se extenderá a varios tipos de cáncer, incluido el mieloma múltiple. La misma empresa ha empezado las fases iniciales de inocuidad para el hombre de otro inhibidor destinado al tratamiento del ictus cerebral y el infarto de miocardio.

El beso de la muerte

El proteosoma no elige proteínas al azar para destruirlas. Corresponde a la célula señalar las proteínas destinadas a ese fin. En su inmensa mayoría, esas proteínas se etiquetan primero con ubiquitina, que debe su nombre a que se encuentra en muchos organismos diferentes. Con sólo 76 aminoácidos, la ubiquitina es una proteína bastante pequeña; se une a proteínas mayores formando largas cadenas. Estas colas de poliubiquitina actúan como códigos postales que encaminan y aceleran las proteínas selladas hacia el proteosoma.

El control del momento de la muerte de una proteína no reside en la propia destrucción en el proteosoma, sino en el proceso de la incorporación de las cadenas de ubiquitina, la ubiquitinación, que requiere energía. Avram Hershko y Aaron Ciechanover, del Instituto Technion de Israel en Haifa, en colaboración con Irwin A. Rose, del Centro Fox Chase de Investigaciones Oncológicas en Filadelfia, han puesto en claro las líneas esenciales de la ubiquitinación.

El proceso de ubiquitinación de las proteínas se desarrolla en varias etapas. En él participan tres enzimas: E1, E2 y E3. La enzima E1 activa la ubiquitina y la asocia a E2. La tercera enzima, E3, facilita entonces la transferencia de la ubiquitina activada desde E2 hasta la proteína. El proceso se repite hasta que una larga cola de ubiquitinas cuelga de la proteína. El proteosoma reconoce en ese instante la cadena de marras y atrae la proteína hacia su interior.

Para conocer por qué se elige una determinada proteína para la ubiquitinación hay que profundizar en las enzimas E3. Dos de los autores (Elledge y Harper), y otros, han descubierto que existen centenares de E3 distintas que reconocen la información encerrada en las secuencias de aminoácidos de otras proteínas que

las convierten en objetivo de la ubiquitinación. Ante condiciones fisiológicas alteradas, pensemos en una infección o una falta de nutrientes, las células pueden modificar las proteínas mediante la adición de grupos fosfato. Esa fosforilación puede trastornar la actividad de una proteína o su capacidad para unirse a las E3. Estas enzimas reconocen también las proteínas que fracasan en el plegamiento o que están alteradas; las hacen entrar en el proceso de limpieza después de marcarlas para que el proteosoma las aprehenda. Muchos procesos celulares clave se apoyan en la estabilidad de las proteínas; por tanto, si desciframos cómo se controla la estabilidad, tendremos la llave de numerosos secretos de la biología.

Mediante el control de la estabilidad de proteínas cruciales, las enzimas E3 regulan el desarrollo de las extremidades, la respuesta inmunita-

La división celular depende de la muerte de proteínas

Para la vida y desarrollo de una célula, adquiere suma importancia su capacidad degradadora de proteínas. Nos lo muestran los estudios sobre la división celular de *Saccharomices cerevisiae*, la levadura del pan. Antes de empezar a dividirse una célula –sea de levadura o humana—, debe empezar por copiar su ADN. Y para iniciar la síntesis de ADN, la célula necesita activar las proteínas Cdk de fase S, compuestas a su vez por dos proteínas, una ciclina y una subunidad de Cdk.

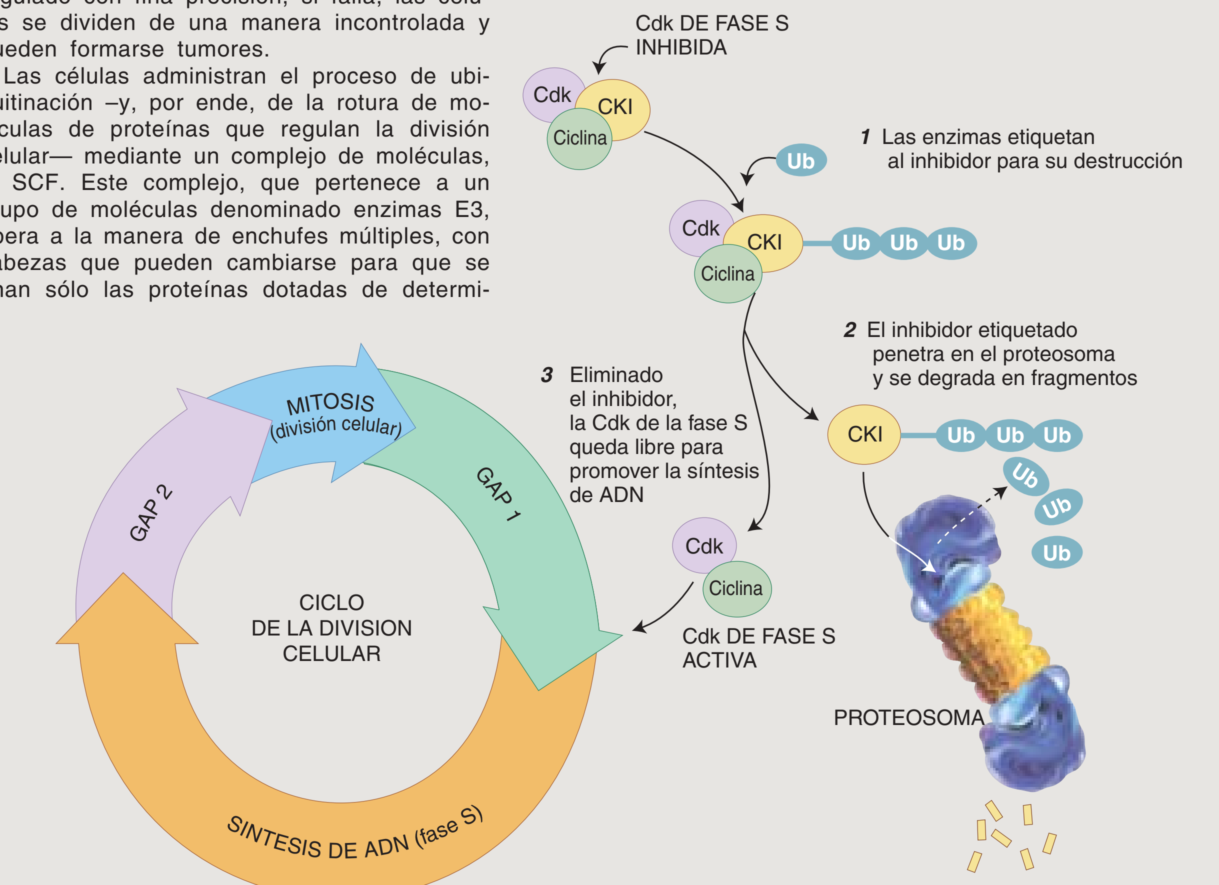
Las Cdk de fase S suelen hallarse inactivas, porque están unidas a proteínas inhibidoras (CKI) que se sintetizaron durante la división celular previa. Para activar las Cdk de fase S, la célula debe desprenderse de las proteínas inhibidoras enviándolas a un proteosoma que las degradará.

La designación de las proteínas inhibidoras destinadas a la destrucción proteosómica requiere el etiquetado de las proteínas con un marchamo de muerte, con una ubiquitina (Ub). El proceso de etiquetado está regulado con fina precisión; si falla, las células se dividen de una manera incontrolada y pueden formarse tumores.

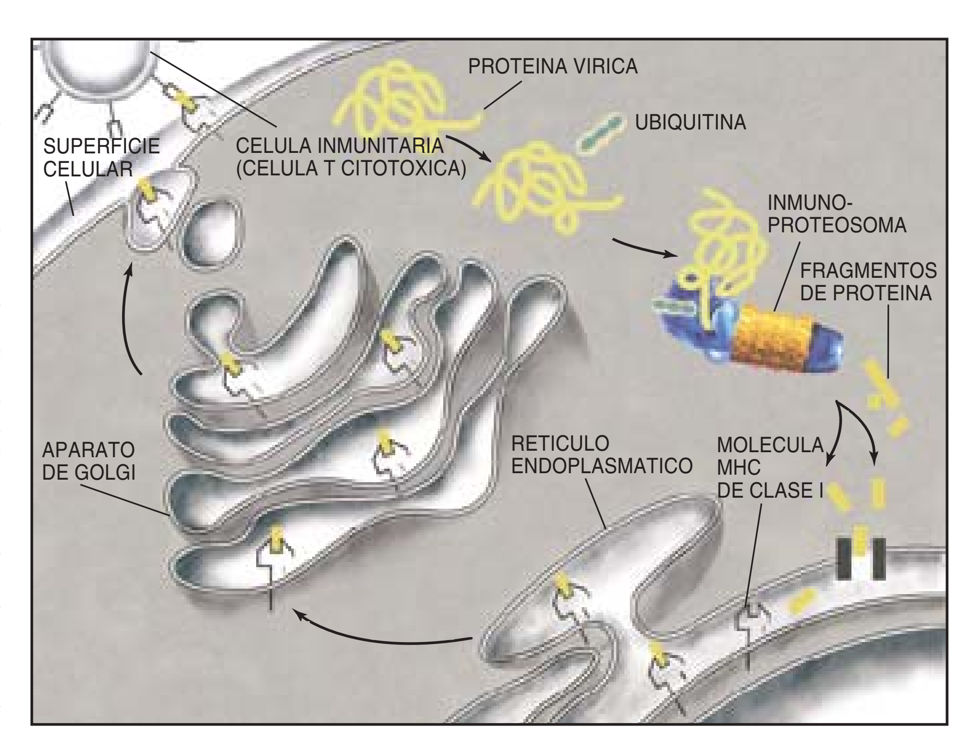
Las células administran el proceso de ubiquitinación –y, por ende, de la rotura de moléculas de proteínas que regulan la división celular— mediante un complejo de moléculas, el SCF. Este complejo, que pertenece a un grupo de moléculas denominado enzimas E3, opera a la manera de enchufes múltiples, con cabezas que pueden cambiarse para que se unan sólo las proteínas dotadas de determinada conformación. Se han identificado más de 217 cabezas del enchufe múltiple, que en el gusano *Caenorhabditis elegans* se conoce por caja F. En las células humanas se han identificado ya varias decenas, cifra que sigue aumentando.

El complejo SCF usa su juego de cabezas para reconocer proteínas que deben destruirse en el proteosoma. En efecto, las células eligen las proteínas a degradar añadiéndoles un grupo fosfato; de ese modo se unirán a las proteínas de la caja F del SCF. El SCF sirve también de intermediario para conducir las proteínas elegidas hasta las enzimas que imprimen el sello mortal de la ubiquitina.

La variedad de complejos SCF confiere a la célula un control selecto sobre los tipos de proteínas —y cuánto de cada uno de ellos— que tiene en sus manos en cualquier momento. Entre las proteínas reguladas por los complejos SCF se numeran las que promueven o inhiben el ciclo de la división celular y las que activan genes. —*S.J.E* y *J.W.H.*



3. EL SISTEMA INMUNITARIO se apoya en los inmunoproteosomas. Estos proteosomas especializados le ayudan a distinguir entre células sanas y células cancerosas o infectadas por virus. En el ejemplo de la derecha, una proteína vírica está marcada con ubiquitina para su destrucción por el inmunoproteosoma. Trozos de la proteína vírica, que constan de ocho a diez aminoácidos, entran entonces en el retículo endoplasmático, donde se unen a moléculas recién sintetizadas, que forman el complejo principal de histocompatibilidad (MHC) de clase I. A medida que las moléculas MHC de clase I cursan por el aparato de Golgi y salen a la superficie celular, van captando los fragmentos de las proteínas víricas. Las células T citotóxicas, del sistema inmunitario, reconocen como material foráneo los trozos del virus encastrados en las moléculas MHC de clase I en la superficie celular y destruyen la célula infectada.



ria, la división celular y la comunicación intercelular, entre otros. Los propios ritmos circadianos y la floración en las plantas caen en la órbita de las enzimas E3. De varias proteínas E3 se conoce incluso su función supresora de tumores u oncogénica, lo que vincula la ubiquitinación al comienzo del proceso canceroso.

Así acontece con el supresor de tumores Von Hippel Lindau (VHL), una E3 que sufre a menudo una mutación en los tumores renales. La función de VHL consiste en demorar el crecimiento celular limitando el desarrollo de los vasos celulares en los tejidos; cuando se produce la mutación, los tumores recién formados generan un rico suministro sanguíneo y crecen rápidamente. Se acaba de encontrar que cierta forma hereditaria de la enfermedad de Parkinson se origina en virtud de una mutación del gen de un tipo de la enzima E3, inductora de la acumulación de proteínas en ciertas células cerebrales y de su aniquilamiento.

Los virus, que se distinguen por derivar en su propio beneficio los procesos celulares, han evolucionado hasta adquirir medios para secuestrar el mecanismo de ubiquitinación y degradación de proteínas en sus ominosos intereses. Sirven de ejemplo los virus del papiloma humano (VPH), que provocan verrugas genitales, cáncer de útero o cáncer de recto. La transformación hacia el desarrollo tumoral se bloquea, habitualmente, por la p53, una de las proteínas supresoras de tumores en el organismo. El VPH recurre a una estratagema para evitar el sistema defensivo celular: fabrica una proteína que se enlaza simultáneamente a la p53 y a una enzima E3. La fatídica unión insta la ubiquitinación de la p53, que así queda marcada para su destino fatal en el proteosoma. Las células, indefensas, se convierten más fácilmente entonces en un cáncer incipiente.

De un truco similar se vale el VIH para destruir la CD4 de la superficie celular, proteína que necesita el virus para infectar las células, aunque bloquea la producción de más virus en una fase ulterior. CD4 constituye el atracadero que le permite al VIH penetrar en las células T del sistema inmunitario; se une a la proteína gp160 que sobresale de la superficie del virus. Pero cuando el VIH se apresta a replicarse en las células recién infectada, la proteína CD4 puede constituir un problema: se adhiere a las proteínas gp160 recién sintetizadas, evitando así que se reúnan con otras proteínas víricas y formar nuevos virus. Para obviar tal obstáculo, el VIH ha desarrollado la Vpu, una proteína que pone a la CD4 en la vía del disparadero. Vpu se une a la CD4 y a un complejo en el que se integra una enzima E3, lo que hace que la proteína CD4 se ubiquitine y caiga después en el proteosoma destructor.

Están apareciendo nuevos datos que realzan la importancia de las E3. No cabe duda de que estas enzimas atraerán el desarrollo de fármacos en el futuro. Puesto que cada E3 es responsable de la destrucción de un número restringido de proteínas, los inhibidores de las E3 deberían ser fármacos muy específicos con pocos efectos secundarios. La identificación reciente de grandes familias de enzimas E3 ha abierto nuevos caminos para la creación de medicinas. De esos hallazgos apasionantes se espera un mejor conocimiento de los fenómenos reguladores y de la propia biología humana. Cuanto más sepamos sobre los proteosomas y la maquinaria de selección para la ubiquitinación, tanto mejor apreciaremos cuánto debe la vida a la muerte de las proteínas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HOW THE CYCLIN BECAME A CYCLIN: REGULATED PROTEOLYSIS IN THE CELL CYCLE. Deanna M. Koepp, J. Wade Harper y Stephen J. Elledge en *Cell*, vol. 97, n.º 4, págs. 431-434; 14 de mayo de 1999.

INTRICACIES OF THE PROTEASOME. Stu Borman en *Chemical and Engineering News*, vol. 78, n.º 12, págs. 43-47; 20 de marzo de 2000.

PROBING THE PROTEASOME PATHWAY. Alfred L. Goldberg en *Nature Biotechnology*, vol. 18, n.º 5, págs. 494-496; 18 de mayo de 2000.



Expresiones culturales de los chimpancés

Los parientes más próximos del hombre distan de nosotros mucho menos de lo que creíamos. Ciertos comportamientos de los chimpancés deben entenderse como hábitos sociales transmitidos de generación en generación

Andrew Whiten y Christophe Boesch



1. LA CAZA DE HORMIGAS constituye una buena forma de procurarse la cena para algunos chimpancés. Este ejemplar, del Parque Nacional de Mahale, en Tanzania, introduce un palito en un hormiguero instalado en el interior de un tronco; una vez que las hormigas han trepado por el palito, el simio lo saca del nido y las recoge con sus labios.

Mientras caminan en sigilo hacia un claro en el bosque de Taï, en Costa de Marfil, los primatólogos prestan atención a una compleja sintonía de fuertes golpes y chasquidos. Parece como si en el interior del bosque hubiera un grupo de personas aplicadas en alguna tarea rutinaria utilizando una técnica primitiva. Al entrar en el espacio abierto observan a varios individuos que trabajan con afán; golpean sus toscos martillos de madera sobre unos yunques de piedra. Uno o dos juveniles, con menos destreza y escaso éxito, practican e intentan alzar el mejor martillo que han encontrado. Tanto frenesí no es sino para abrir las duras nueces del nogal africano, muy nutritivas. De manera intermitente los individuos dejan a un lado sus herramientas y van a buscar más nueces. Un bebé, sentado con su madre, recoge trocitos de nueces cascadas.

En muchos sentidos, podríamos estar hablando de un grupo de personas dedicadas al forrajeo. Los martillos y yunques abandonados, algunos de piedra, estimularían la imaginación de cualquier antropólogo que buscara signos de una civilización primitiva. Pero nuestros habitantes del bosque no son personas. Se trata de chimpancés.

Aunque las semejanzas entre el chimpancé y el hombre han sido objeto de estudio desde hace mu-

El club cultural

Un equipo internacional de expertos ha desarrollado la investigación más completa sobre los chimpancés jamás acometida

Las expresiones culturales de los chimpancés se han venido estudiando desde hace varios decenios. Pero, muy a menudo, estos estudios adolecían de una limitación importante. En su mayoría los esfuerzos empeñados en documentar la diversidad cultural se circunscribían a las descripciones publicadas oficialmente sobre los comportamientos registrados en cada enclave de investigación. Semejante enfoque pasaba por alto una gran cantidad de variación cultural. Por una triple razón.

Primera: los científicos suelen publicar listas detalladas de todas las actividades que *no* se han observado en un enclave particular. Pero eso es justamente lo que importa saber: qué comportamientos se observaron y cuáles no en cada lugar. Segunda: muchos estudios describen los comportamientos sin especificar la frecuencia con que aparecen; sin esta información es imposible determinar si una acción es un caso excepcional o si es un episodio rutinario que debería considerarse parte de la cultura de los animales. Tercera: la descripción de comportamientos potencialmente significativos aportada carece a menudo del suficiente detalle, lo que dificulta que los que trabajan en otros lugares puedan registrar la presencia o ausencia de tales actividades.

Para salir al paso de estos problemas, decidimos seguir un nuevo enfoque. Pedimos a los investigadores de cada grupo que elaboraran una lista de todos los comportamientos que, según ellos, podrían constituir tradiciones locales. Con esa información en la mano, construimos un elenco exhaustivo de 65 pautas de comportamiento susceptibles de entrar en la categoría de expresión cultural.

Se distribuyó luego la lista entre todos los jefes de equipo de cada enclave considerado. Tras deliberar con sus colegas, estos investigadores clasificaron cada comportamiento en función de su ocurrencia o ausencia en la comunidad de chimpancés estudiada por el equipo. Las categorías clave utilizadas fueron: comportamiento tradicional (desarrollado por la mayoría o la totalidad de capacitados para ello, en al menos un sexo o clase de edad; por ejemplo, en todos los machos adultos), habitual (menos frecuente que el tradicional, pero que ocurre repetidamente en varios individuos), presente (se ha observado el comportamiento, aunque no es habitual), ausente (no se ha observado nunca) e indeterminado.

Nuestra encuesta se concentró en siete enclaves donde los chimpancés están habituados a los observadores humanos. El estudio recopiló un total de más de 150 años de observación de chimpancés. El criterio seguido para clasificar cualquier comportamiento como una variante cultural fue su ausencia en al menos una de las comunidades estudiadas, acompañada de su frecuencia como comportamiento habitual o tradicional en al menos otra comunidad. Nuestra encuesta se centró, por supuesto, en ese tipo de comportamientos. (La ausencia de ciertos comportamientos en una comunidad determinada puede estar causada por razones específicas del lugar; tales expresiones se dejaron fuera del estudio. Por ejemplo, aunque los chimpancés de Bossou recogen sabrosas algas de estanques con un palo, los de otros lugares no lo hacen, por la sencilla razón de que en esos enclaves no hay algas que recoger.)

De la encuesta resultaron no menos de 39 patrones de comportamiento que merecen reputarse variaciones culturales; entre ellas, formas de uso de herramientas, técnicas de acicalamiento y estrategias de cortejo. Tamaña riqueza cultural es mucho mayor que lo que conocemos en cualquier otra especie animal. *—A.W. y C.B.*

chos años, sólo en el postrer decenio la investigación ha establecido que los parecidos trascienden lo que se suponía. Sea, por ejemplo, el procedimiento seguido para cascar nueces. El método observado en el bosque de Taï dista mucho de ser un comportamiento simple en los chimpancés; constituye una adaptación única que sólo se encuentra en esa región de Africa. Los biólogos consideran ese rasgo una expresión de cultura en los chimpancés. La ciencia acude a menudo al término “cultura” para designar comportamientos animales de carácter elemental, como los dialectos regionales de poblaciones diferentes de aves canoras. Pero las ricas y variadas tradiciones culturales que encontramos en los chimpancés sólo son superadas en su complejidad por tradiciones humanas.

A lo largo de los dos últimos años se ha trabajado en una colaboración sin precedentes, integrada por los principales grupos de investigación sobre chimpancés. Merced a ese empeño conjunto, se ha obtenido el registro de una multitud de patrones culturales distintivos, que abarcan el continente africano e implican acciones que van desde el uso de herramientas por los animales hasta la existencia de diferentes formas de comunicación y hábitos sociales. El nuevo cuadro que está emergiendo cuestiona no sólo la idea que teníamos de esos simios, sino también nuestros planteamientos sobre lo que nos singulariza, amén de



2. DEMOSTRACION DE COMO CASCAR una nuez de nogal africano. En el bosque de Taï, Costa de Marfil, una mamá chimpancé utiliza un martillo de piedra para abrir una nuez mientras un joven la observa. No todos los chimpancés de esta zona han desarrollado este comportamiento: en la orilla este del río Sassandra-N’zo, los chimpancés no cascan las nueces, aunque otros individuos de su misma especie, que viven a escasos kilómetros de distancia, lo hagan. A ambas riberas se encuentran todos los materiales; en las dos podrían, pues, cascarse las nueces aplicando la técnica de Taï. Pero el río ha servido de barrera cultural.

ANDREW WHITEN y CHRISTOPHE BOESCH han colaborado desde 1998 en el estudio comparado de la cultura en los chimpancés. Whiten, miembro de la Academia Británica, enseña psicología evolutiva y del desarrollo en la Universidad escocesa de Saint Andrews. Boesch, codirector del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva en Leipzig, da clases en la Universidad de Leipzig. Los directores de los estudios de campo con chimpancés aludidos en este artículo son Jane Goodall, del Instituto Jane Goodall en Washington, Willian C. McGrew, de la Universidad de Miami, Toshisada Nishida, de la de Kyoto, Vernon Reynolds, de la de Oxford, Yukimaru Sugiyama, de la de Tokaigakuen, Caroline E. G. Tutin, de la de Stirling, y Richard Wrangham, de la de Harvard.

ofrecernos pistas sobre los remotos orígenes de la extraordinaria capacidad para la cultura que caracteriza a la humanidad.

Expresiones de cultura

Homo sapiens y *Pan troglodytes* han coexistido durante cientos de milenios. Comparten más del 98 por ciento de su material genético. Ello no obstante, hasta hace 40 años no sabíamos casi nada sobre el comportamiento de los chimpancés en la naturaleza. Las cosas comenzaron a cambiar en los años sesenta, cuando Toshisada Nishida, de la Universidad japonesa de Kyoto, y Jane Goodall comenzaron sus estudios de chimpancés salvajes en sendos enclaves de Tanzania. (La estación de Gombe, donde trabajó Goodall, fue la primera de este tipo y sigue siendo la más famosa; la de Nishida en Mahale fue la segunda estación de campo para el estudio de chimpancés que se creó en el mundo.)

En esos trabajos pioneros, y a medida que los chimpancés se iban acostumbrando a ser observados de cerca, se produjeron los primeros descubrimientos notables. Los investigadores presenciaron todo un repertorio de comportamientos inesperado: fabricación y uso de herramientas, caza, ingestión de carne como parte de la dieta, compartir comida y las luchas entre miembros de comunidades vecinas que podían llegar a ser letales. En los años que siguieron otros primatólogos se establecieron en nuevos enclaves; pese a los problemas financieros, políticos y logísticos que suelen acompañar a los estudios de campo en Africa, varios de estos campos de trabajo se convirtieron en proyectos de larga duración. Resultado de esa labor, contamos con un registro científico exhaustivo de la vida de los chimpancés en diversas comunidades distribuidas por el continente africano.

Ya en 1973 Goodall registró 13 formas distintas de usar herramientas, así como ocho actividades sociales que parecían diferir entre los chimpancés de Gombe y los de otras poblaciones. Postuló que algunas variaciones habían tenido lo que ella denominó un origen cultural. Pero, ¿a qué se refería cuando hablaba de "cultura"? En su acepción común, llamamos cultura a las costumbres y creaciones de una época o un pueblo particular. La diversidad de las culturas humanas abarca desde variaciones técnicas hasta rituales matrimoniales, desde hábitos culinarios hasta mitos y leyendas. Los animales no tienen mitos ni leyendas. Pero sí poseen la capacidad de transmitir caracteres conductuales de generación en generación, no a través de sus genes, sino mediante el aprendizaje. De acuerdo con el criterio fundamental admitido por los biólogos, un carácter se reputará cultural si puede aprenderse observando las habilidades mostradas por otros y se transmite así a las generaciones futuras (*véase el recuadro* "¿Pueden los simios imitar?").

En los años noventa, el descubrimiento de nuevas diferencias de comportamiento entre los chimpancés permitió el empezar a construir un cuadro completo de sus variaciones culturales. William C. McGrew, en su libro *Chimpanzee Material Cultures*, publicado en 1992, recogía 19 formas distintas de uso de herramientas en diferentes comunidades. Uno de los autores (Boesch), en colaboración con Michael Tomasello, del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva en Leipzig, identificó 25 actividades que podían constituir caracteres culturales en poblaciones salvajes.

El catálogo más reciente sobre variaciones culturales ha sido fruto de un empeño conjunto, sin precedentes, en el que han tomado parte nueve expertos (incluidos los autores). Se han recogido prolongadas investigaciones de campo, que, en total, suman 151 años de observación de chimpancés (*véase el recuadro* "El club cultural"). Se elencan 39 patrones de comportamiento que tienen un origen cultural; se incluyen, entre otras actividades, el uso de palitos para la "caza" de hormigas, la construcción de asientos mediante hojas secas y un extenso repertorio de hábitos concernientes al acicalamiento social. Estas 39 variantes sitúan a los chimpancés en una clase única, con costumbres mucho más elaboradas que las halladas en ninguna otra especie animal estudiada hasta la fecha. Ni que decir tiene que los chimpancés persisten muy lejos de los seres hu-

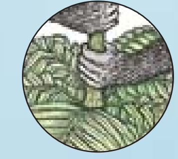


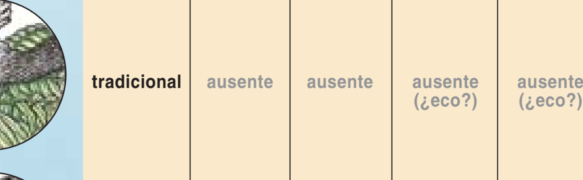
3. "APRETON DE MANOS" durante el mutuo acicalamiento, un gesto muy común entre los chimpancés de los bosques de Taï, Mahale y Kibale. En la fotografía dos individuos de Mahale se espulgan con una mano así apretada. Las recientes investigaciones de William C. McGrew y Linda F. Marchant, de la Universidad de Miami, muestran que las dos comunidades adyacentes en Mahale presentan diferencias sutiles en la forma del apretón. En una de las comunidades se evita el contacto palma con palma, estilo que, sin embargo, es común entre sus vecinos. En 40 años de observaciones en Gombe, no se ha observado nunca el gesto de unir las manos; los chimpancés a veces se agarran a una rama sobre sus cabezas, pero nunca aprietan la mano de su compañero de acicalamiento.

Guía de las culturas de los chimpancés

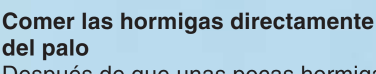
Con el fin de catalogar las variaciones culturales entre los chimpancés, solicitamos de los investigadores que trabajan en seis enclaves de Africa central que clasificaran los comportamientos en función de su presencia o ausencia en siete comunidades. (En Mahale existen dos comunidades diferentes.) Las categorías clave fueron: comportamiento tradicional (que ocurre en la mayoría o en todos los miembros de un sexo o clase de edad), comportamiento habitual (menos frecuente aunque reiterado), comportamiento presente, comportamiento ausente e indeterminado. Ciertos comportamientos están ausentes por razones ecológicas (eco); en Budongo los chimpancés no usan martillos para abrir nueces del nogal africano por la sencilla razón de que allí no hay nueces. La encuesta registró hasta 39 rituales que se reputan variaciones culturales. Ilustramos en el cuadro 18 de ellos.

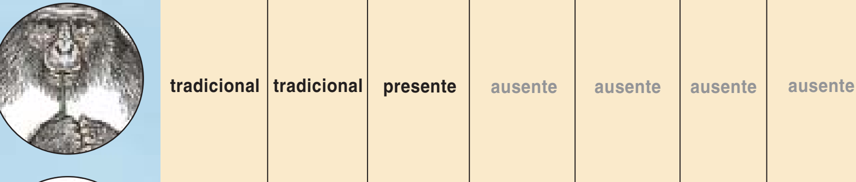
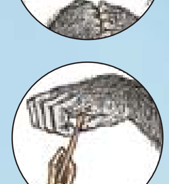
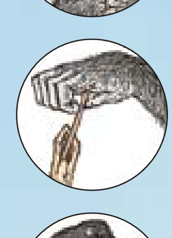
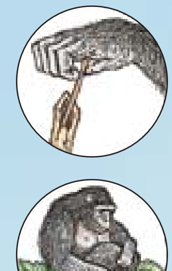
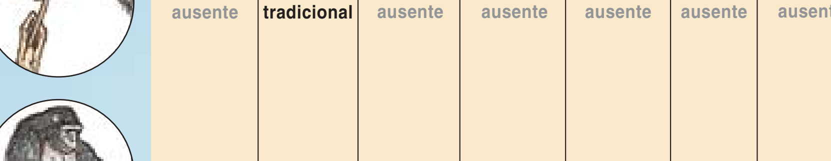
—A. W. y C. B.

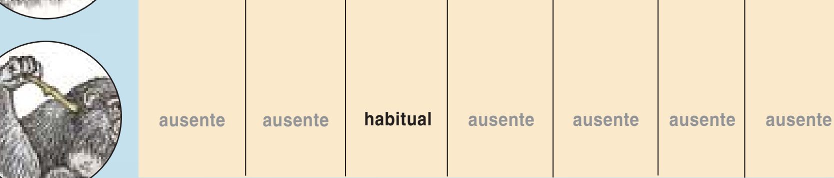








	BOSSOU	BOSQUE DE TAÏ	GOMBE	MAHALE, GRUPO M	MAHALE, GRUPO K	KIBALE	BUDONGO
Martillear nueces Para abrir las nueces del nogal africano, muy nutritivas, se valen de piedras a modo de martillos y yunques rudimentarios.	tradicional	tradicional	ausente	ausente	ausente	ausente (¿eco?)	ausente (eco)
Hendir con mano de mortero Con tallos de palmáceas a modo de manos de mortero, hienden y agujerean los árboles.	tradicional	ausente	ausente	ausente (¿eco?)	ausente (¿eco?)	ausente (¿eco?)	ausente (¿eco?)
Cazar termitas Introducen trizas de corteza flexibles en termiteros para extraer insectos que les servirán de alimento.	ausente	ausente (eco)	tradicional	ausente	tradicional	ausente (eco)	ausente (¿eco?)
Retirar hormigas del palo manualmente Una vez que las hormigas se han arremolinado en la mitad del palo introducido en el nido, pasan el palo a través de su puño cerrado y se las llevan a la boca.	presente	ausente	tradicional	ausente	ausente	ausente	ausente
Comer las hormigas directamente del palo Después de que unas pocas hormigas han trepado por el palito introducido en el hormiguero, se acercan el palito a la boca para ingerirlas.	tradicional	tradicional	presente	ausente	ausente	ausente	ausente
Extraer la médula ósea Con la ayuda de palitos, extraen la médula ósea, para comérsela, de los huesos largos de los monos a los que han matado y devorado.	ausente	tradicional	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
Sentarse sobre una estera de hojas Amontonan hojas grandes para protegerse cuando tienen que sentarse sobre suelo húmedo.	presente	habitual	ausente	ausente	ausente	presente	ausente
Espantar moscas Para quitarse de encima las moscas, utilizan ramas con hojas a modo de espantamoscas.	ausente	habitual	presente	ausente	ausente	ausente	habitual
Rascarse Utilizan un palo o una piedra grande para rascarse zonas de su cuerpo irritadas.	ausente	ausente	habitual	ausente	ausente	ausente	ausente

Bossou, Guinea

Bosque de Taï, Costa de Marfil

Budongo, Uganda

Kibale, Uganda

Gombe, Tanzania

Mahale, Tanzania

BOSSOU	BOSQUE DE TAÏ	GOMBE	MAHALE, GRUPO M	MAHALE, GRUPO K	KIBALE	BUDONGO
tradicional	tradicional	tradicional	tradicional	ausente	presente	presente
ausente	presente	presente	ausente	ausente	tradicional	ausente
tradicional	tradicional	ausente	tradicional	tradicional	habitual	tradicional
ausente	ausente	habitual	indeter-minado	indeter-minado	ausente	ausente
ausente	ausente	presente	indeter-minado	indeter-minado	ausente	tradicional
ausente	tradicional	presente	ausente	ausente	ausente	ausente
ausente	habitual	ausente	tradicional	tradicional	tradicional	ausente
presente	tradicional	habitual	tradicional	tradicional	ausente	ausente
ausente	habitual	tradicional	tradicional	tradicional	tradicional	habitual



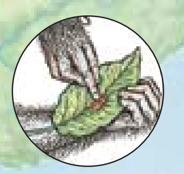
Lanzar objetos
Pueden lanzar piedras y palos con un claro propósito, aunque fallando a menudo.



Inspeccionar heridas
Cuando sufren una herida, se pasan hojas por la misma y después examinan la hoja. En algunos casos, mastican las hojas antes de rozar las heridas.



Cortar hojas
Con objeto de atraer compañeros de juego o hembras fértiles, los machos utilizan los dientes para triturar hojas, sin comérselas.



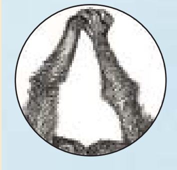
Aplastar parásitos sobre las hojas
Durante el mutuo acicalamiento, limpian los parásitos del pelaje de su compañero, los coloca sobre una hoja y entonces los aplastan.



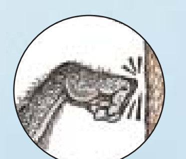
Inspeccionar parásitos
Colocan los parásitos extraídos durante el espulgamiento sobre una hoja en la palma de la mano, inspeccionan el insecto y después o bien se lo comen o se deshacen de él.



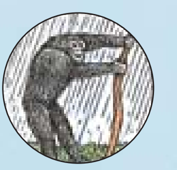
Aplastar parásitos con los dedos
Limpian de parásitos el pelaje de su compañero de acicalamiento, los ponen en uno de sus antebrazos y los golpean repetidamente antes de comérselos.



Apretar las manos sobre la cabeza
Dos chimpancés se dan un apretón de manos sobre sus cabezas mientras se acicalan mutuamente con la otra mano.



Golpear con los nudillos
Para atraer la atención durante el cortejo, golpean con sus nudillos en árboles u otras superficies duras.



Danzar bajo la lluvia
Cuando comienza a llover intensamente, los machos adultos ejecutan exhibiciones de ataque que acompañan con el arrastre de ramas, golpes sobre el suelo y sobre raíces, así como emisión de sonidos y resoplidos.

manos, cuyas variaciones culturales son incontables. (Debemos señalar, sin embargo, que la ciencia apenas ha empezado a abordar la complejidad que encierra el comportamiento de los chimpancés; por tanto, el número 39 representa sólo un número mínimo de los caracteres culturales desarrollados por la especie.)

Chimpancés multiculturales

A la hora de describir las costumbres humanas, los antropólogos y sociólogos suelen hablar de una "cultura americana", una "cultura china", etcétera, donde bajo tal expresión se amparan actividades diversas: lenguaje, formas de vestir y de comer, rituales matrimoniales y otros. En los animales, sin embargo, la cultura se define por un solo comportamiento; por ejemplo, los dialectos en el canto de algunos pájaros. Los ornitólogos no han hallado variaciones en patrones de cortejo o en costumbres alimentarias, que acompañen a las diferencias dialectales.

Pero los chimpancés presentan algo más que caracteres culturales solitarios. Cada banda exhibe un repertorio entero de comportamientos distinto del de otros grupos. Resulta, pues, apropiado hablar de la "cultura de Gombe" o de la "cultura de Taï". Basta observar cómo se comporta un chimpancé, para inferir dónde vive. Si un individuo casca nueces, corta hojas durante el concierto de tambores, "caza" hormigas con una mano usando un palito y golpea con los nudillos para atraer a una hembra, procede del bosque de Taï. Si retira parásitos de las hojas y aprieta su mano con la del compañero durante el mutuo acicala-

¿Pueden los simios imitar?

La investigación revela que los chimpancés y otros simios aprenden a través de la imitación

La idea de que los grandes simios —chimpancés, gorilas, orangutanes y gibones— pueden imitar no sorprenderá probablemente a quienes los hayan visto jugar en un zoológico. Pero en los círculos académicos tal capacidad se ha convertido en objeto de controversia.

Pensemos en un chimpancé joven que mira cómo consigue su madre abrir una nuez de nogal africano, según se ha comprobado en el bosque de Taï. En la mayoría de los casos, nuestro juvenil terminará por practicar por sí mismo. ¿Ocurre esto porque imita a su madre? Los escépticos creen que quizá no sea ése el caso y postulan que fue la atención de su madre sobre las nueces lo que le animó a dirigir la mirada hacia el mismo objeto. Una vez que se ha fijado en esa fuente de alimento, el juvenil podría aprender cómo abrir las nueces mediante ensayo y error, no a través de la imitación de su madre.

Una distinción nada bizantina y con importantes derivaciones en cualquier análisis sobre la expresión cultural de los chimpancés. Para unos, por carácter cultural debe entenderse la expresión de los adultos transmitida a los jóvenes mediante imitación, no por vía hereditaria. En consecuencia, no se considerará parte de la cultura el comportamiento del chimpancé que aprende a abrir nueces por sí mismo en cuanto tiene a mano una piedra que le sirve de martillo. Más aún, si sólo aprenden mediante ensayo y error, entonces los chimpancés deben, digámoslo así, reinventar la rueda cada vez que evidencian una nueva habilidad. En el marco de esa tesis, no cabe el desarrollo de una cultura acumulativa.

Para averiguar cómo aprenden, nada mejor que los experimentos de laboratorio. Uno de los autores (Whiten), en colaboración con Deborah M. Custance, de la Universidad de Londres, preparó un fruto artificial que remedaba el fruto natural que les alimentaba en la selva. Entrados en el experimento, un grupo de chimpancés contemplaba una técnica compleja para abrir uno de estos frutos, mientras que un segundo grupo observaba otro método diferente; registrábamos en qué medida los chimpancés quedaban condicionados por el método presenciado. Extendimos los experimentos a niños de tres años. De acuerdo con nuestros resultados, los chimpancés de seis años muestran comportamientos imitativos que se asemejan notablemente a los que observamos en los niños, aunque su fidelidad mimética tiende a ser menor.

En otra línea de ensayos seguida por Boesch y sus colaboradores, se proporcionó a los chimpancés del zoológico de Zurich martillos y nueces similares a los disponibles en la naturaleza. Se tomó nota del repertorio de comportamientos exhibido por los simios. Resultó que, en el zoo, los chimpancés desplegaban un abanico de actividades más amplio que el observado en su hábitat natural. Esa discrepancia se debe, así lo interpretamos, a que el ambiente cultural de los chimpancés en la selva ha canalizado el comportamiento de los jóvenes y lo ha dirigido en la dirección de las habilidades más útiles. En el zoológico, donde los animales no pueden aprovecharse de las ventajas de la tradición, los chimpancés ensayaron con una gran variedad de operaciones mucho menos útiles.

Importa resaltar que los resultados de algunos de los experimentos con frutos artificiales convergían hacia esta idea. En un estudio, los chimpancés copiaron una secuencia completa de acciones que habían presenciado, pero lo hicieron sólo después de observarla varias veces y de probar otras alternativas. Tendían a imitar lo que habían observado a otros hacer, a expensas de sus propios descubrimientos por ensayo y error.

Tomados en su conjunto, los resultados demuestran que los simios imitan y que esta habilidad constituye una de las vías de la transmisión cultural. Es difícil imaginar cómo podrían desarrollar las variaciones geográficas reseñadas a propósito de la caza de hormigas o el trato con los parásitos sin copiar tradiciones establecidas. Sin duda, copian a otros miembros del grupo.

Pero, igual que ocurre con las personas, ciertos caracteres culturales se transmitieron por combinación de imitación y otras formas más simples de aprendizaje social; por ejemplo, poner la atención en herramientas útiles. En cualquier caso, el aprender de los mayores forma parte del desarrollo de un chimpancé en su medio natural.

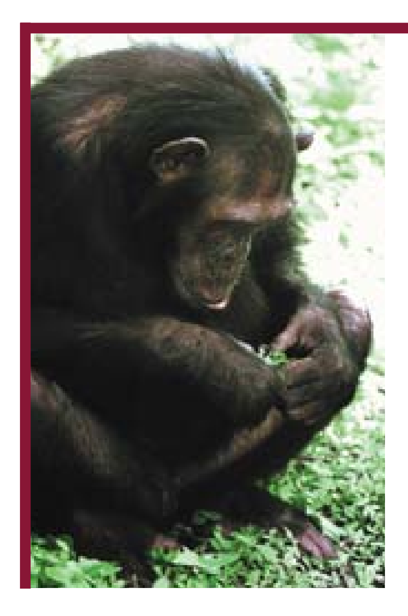
—A. W. y C. B.



LA PERFECCION se alcanza sólo con la práctica. Así lo demuestra este juvenil que intenta "pelar" una fruta artificial, proporcionada por los investigadores, después de observar cómo se las arreglaban otros chimpancés. Los experimentos de este tenor ayudan a determinar el aprendizaje por mímesis.

miento, puede provenir del bosque de Kibale o de las montañas de Mahale, pero si, además, usa un palito para cazar hormigas, no cabe la menor duda de que es originario de Mahale.

Las expresiones culturales de los chimpancés trascienden la mera presencia o ausencia de un comportamiento particular. En efecto, todos espulgan los parásitos encontrados en el mutuo acicalamiento; ahora bien, en Taï aplastan con el dedo los parásitos sobre los antebrazos, en Gombe los aplastan contra hojas de la vegetación y en Budongo los colocan en una hoja para inspeccionarlos antes de comérselos o desecharlos. Cada grupo ha desarrollado una técnica particular para un mismo fin. Por otro lado, también existen comportamientos que, aunque puedan parecer semejantes, se desenvuelven en contextos diferentes: durante el cortejo los machos de Mahale cortan hojas ruidosamente con los dientes, mientras que en Taï incorporan esa operación cortadora dentro de sus conciertos de tambores.



4. LA MUTUA LIMPIEZA constituye una fuente de fascinación para los chimpancés de todas las poblaciones conocidas. Difiere, no obstante, la forma en que unos y otros tratan a parásitos fastidiosos tales como pulgas y piojos. Los del este de Africa, como este ejemplar de Gombe, a veces se turnan entre espulgar a un compañero y "espulgar" hojas. Cuando los chimpancés de Gombe encuentran parásitos, los pueden poner encima de un montón de hojas; luego, con cuidado, los aplastan con las uñas de sus pulgares, antes de comérselos. En Budongo, colocan los insectos encima de hojas y los inspeccionan antes de comérselos o desecharlos. En cambio, los chimpancés del bosque de Taï no recurren a las hojas; depositan a los parásitos en sus antebrazos y los golpean repetidamente con las yemas de los dedos hasta aplastarlos. Todos los chimpancés del este de Africa han incorporado hojas en sus hábitos de espulgamiento, lo que indica un origen común de esta práctica en esa franja.

Las consecuencias de este nuevo enfoque sobre expresiones culturales de los chimpancés son múltiples. Entre ellas, nos obliga a reflexionar sobre las características exclusivas propias de nuestra especie. Nuestra capacidad de desarrollo cultural no constituye una diferencia tan radical, después de todo.

Las diferencias entre las costumbres y tradiciones humanas, enriquecidas y mediadas por el lenguaje, son enormes comparadas con lo que encontramos en los chimpancés. Más que amenazarla, la historia de sus expresiones culturales refuerza nuestra conciencia de la singularidad de la especie humana.

Las creaciones humanas han realizado un enorme progreso acumulativo durante generaciones, un fenómeno que Boesch y Tomasello han denominado "efecto trinquete". El concepto de martillo se ha mejorado en incontables ocasiones hasta nuestros días, en que disponemos de martillos robots accionados por control electrónico. Los chimpancés quizá presenten los comienzos de este efecto "trinquete" —algunos que usan piedras por yunque han dado un paso más, como los de Bossou, y colocan otra piedra debajo del yunque cuando necesitan nivelar un terreno irregular—, pero tales comportamientos no se han generalizado y, por supuesto, resultan rudimentarios cuando los ponemos al lado de los logros humanos.

La capacidad para la cultura que compartimos con los chimpancés sugiere también el origen remoto de las habilidades mentales subyacentes. Nuestra naturaleza cultural evolucionó a partir de unos comienzos simples. Un aprendizaje social similar al que presentan los chimpancés podría ser sustentar las primeras culturas líticas de los antepasados humanos que vivieron hace dos millones de años.

Todavía es pronto para saber si los chimpancés son la única especie del planeta que comparte la capacidad para la cultura con el hombre. No se han acometido los estudios de campo necesarios para comprobarlo. Pero hay indicios de que otros animales deberían también entrar en el debate. El grupo de Carel P. van Schaik ha descubierto que los orangutanes de Sumatra emplean de manera habitual dos tipos de herramientas, por lo menos; comportamientos que no se han observado en otros lugares donde se ha estudiado su conducta durante años.

En el mundo de las ballenas Hal Whitehead y su equipo han observado que grupos distintos que utilizan dialectos diferentes cazan también de manera diversa. Esperamos que nuestro método de documentación de las expresiones culturales en los chimpancés sirva de pauta para el estudio de estas otras especies "promesa".

Pero, ¿qué significado encierran para los propios chimpancés? No podemos dejar de denunciar la trágica pérdida de poblaciones diezmadas, ahora que comenzamos a conocer mejor a estos portentosos animales. Las poblaciones han caído en picado a lo largo de los últimos 100 años, declive que continúa con la captura ilegal, la tala de los bosques y el comercio de su carne. La explotación maderera ha trazado carreteras que ahora se utilizan para la captura de animales que habitaban los bosques —incluido el chimpancé— cuya carne se consume en países europeos. Con tamaña destrucción desaparece el animal y las expresiones culturales, fascinantes, que han creado.

Podría ser, sin embargo, que la riqueza cultural de los simios les supusiera la salvación. Gracias a actividades conservacionistas, empieza a cambiar la actitud de los lugareños. Algunas organizaciones han comenzado a mostrar vídeos que ilustran las extraordinarias habilidades cognitivas de los chimpancés. Más de uno se ha convencido de que no debe comer la carne de quien tanto se le parece.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CULTURES IN CHIMPANZEES. A. Whiten, J. Goodall, W. C. McGrew, T. Nishida, V. Reynolds, Y. Sugiyama, C. E. G. Tutin, R. W. Wrangham y C. Boesch, en *Nature*, vol. 399, páginas 682-685, 1999.

CHIMPANZEES OF THE TAÏ FOREST: BEHAVIORAL ECOLOGY AND EVOLUTION. Christophe Boesch y Hedwige Boesch-Aschermann. Oxford University Press, 2000.

PRIMATE CULTURE AND SOCIAL LEARNING. Andrew Whiten en *Cognitive Science*. Número especial sobre cognición en primates, vol. 24, páginas 477-508; 2000.

Carol Ezzell

THOMAS R. CECH: Codescubridor de las ribozimas

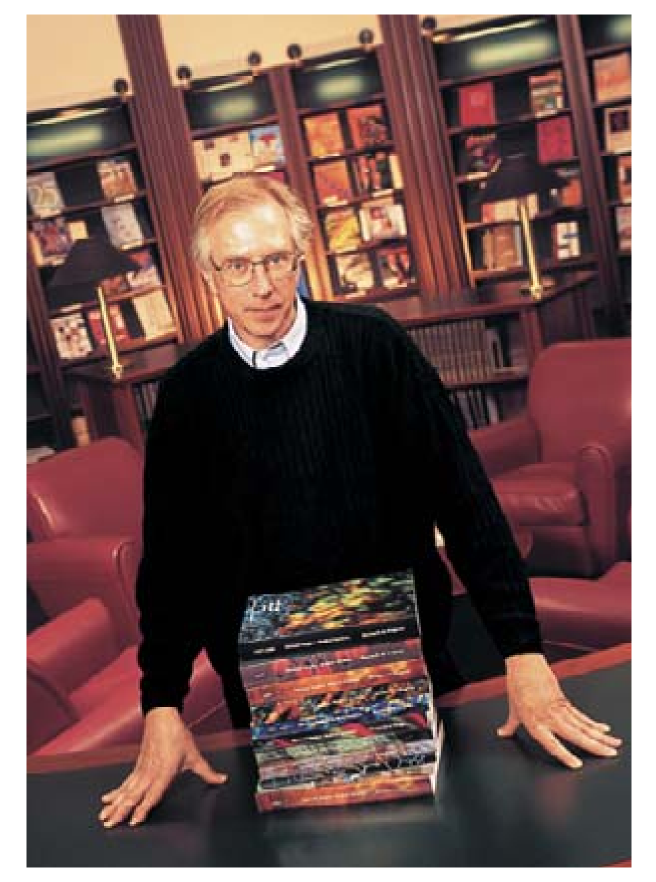
CHEVY CHASE (MARYLAND). —¿Qué se siente al dirigir la mayor institución privada de investigación biomédica de los Estados Unidos? "Pues que es muy estimulante", replica Thomas R. Cech con una sonrisa forzada. "A veces me quita el sueño."

El mes de enero del año pasado, asumió el cargo de presidente del Instituto Howard Hughes de Medicina (HHMI), que sufraga la ciencia biomédica fundamental en mayor cuantía que cualquier otra organización de los Estados Unidos, quitado el gobierno. Desde ese puesto, dirige una empresa de investigación que comprende un selecto grupo de 350 científicos, repartidos por toda la nación, considerados como la flor y nata de sus respectivas especialidades. También supervisa la adjudicación de millones de dólares cada año en becas, sobre todo para la educación en todos los niveles, desde la escuela primaria hasta estancias postdoctorales. Podría decirse que esas dos responsabilidades, junto con sus notables hallazgos científicos propios, hacen de Cech una de las personalidades más sobresalientes de la biomedicina.

Tomó las riendas del HHMI en un momento crítico. La financiación para la investigación biomédica es ahora mayor que nunca: el presupuesto anual del Instituto Nacional de la Salud (NIH) está en su apogeo, habiendo alcanzado los 18.000 millones de dólares, y podría duplicarse en los próximos cinco años, si cuajan las propuestas que en esa dirección se debaten en el Congreso. Si a eso se le añaden los 575 millones de dólares que aportó en el año 2000 el HHMI, la investigación biomédica puede nadar en la abundancia. (El Wellcome Trust, de Londres, con su dote de 17.900 millones de dólares, es la mayor organización filantrópica médica del mundo, y gasta 550 millones de dólares al año en investigación.)

Es también una época de rápidos cambios. Habrá que estudiar numerosos aspectos éticos anejos a las nuevas biotecnologías, como son la clonación o la obtención de células madre a partir de embriones humanos. Y las relaciones cada vez más estrechas entre científicos de las universidades y compañías biofarmacéuticas están abriendo interrogantes sobre la conveniencia de tales vinculaciones y sobre las consecuencias que tienen en el trabajo investigador.

A los responsables del HHMI les gusta describir la organización como "un instituto sin paredes". En vez de contratar a quienes más destacan, sacándoles de sus laboratorios universitarios para agruparlos en un enorme centro de investigación, el HHMI ofrece a los científicos una subvención que les permite permanecer en sus instituciones, educando a quienes han de tomar el testigo. El instituto se jacta de apoyar toda la trayectoria científica de las personas, y no sólo proyectos particulares, como la mayoría de las subvenciones del NIH. El HHMI se concentra en seis áreas: biología celular, genética, inmunología, neurociencias, biología computacional y biología estructural, que se ocupa de estudiar las estructuras tridimensionales de las moléculas biológicas. El HHMI también adopta una política de transparencia respecto a los intereses comerciales en la investigación y ha prohibido ciertas clases de compromisos de los investigadores con la industria.

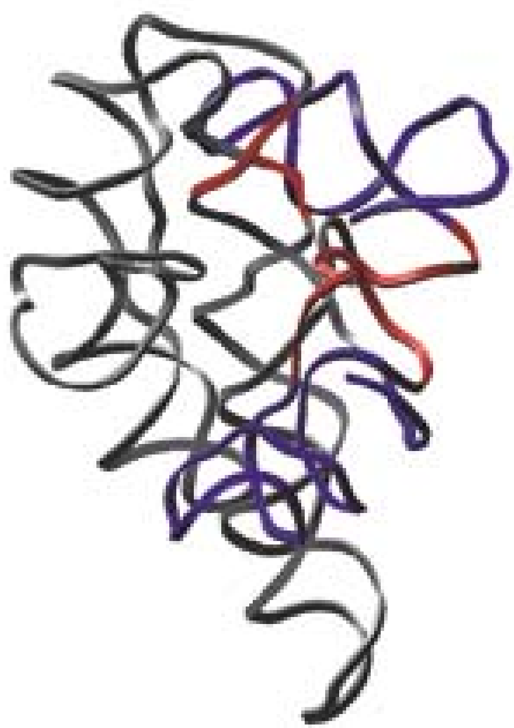


El HHMI, una de las instituciones filantrópicas más acaudaladas, cuyas oficinas centrales están en Chevy Chase, Maryland, justo al lado del NIH, se beneficia de una dote de nada menos que de 13.000 millones de dólares. (Fundada por el magnate de la aviación Howard Hughes, la organización se ha nutrido desde 1984 de la venta de Hughes Aircraft, efectuada tras la muerte del dueño.) El instituto pasó por épocas en las que le resultaba difícil llegar a gastar parte suficiente de los intereses que generaba su capital para satisfacer a la Hacienda estatal.

Las sólidas finanzas del HHMI le han permitido encontrar investigadores del más alto nivel. Cech, por ejemplo, ganó el premio Nobel de química (compartido con Sidney Altman, de la Universidad de Yale) en 1989, trabajando en el HHMI. Otros cinco premios Nobel figuran en la nómina del instituto, entre ellos Eric R. Kandel, de la Universidad de Columbia, que compartió el de medicina del año 2000.

A pesar de su escaso número, los investigadores del HHMI tienen también una influencia destacada en la in-

Las ribozimas, de las que Cech es codescubridor, están hechas de ARN pero actúan también como enzimas, pues cortan y empalman material genético



vestigación biomédica. Según un informe aparecido en el número de septiembre/octubre de *Science-Watch*, que analiza las tendencias en la investigación, las citas de artículos de revistas especializadas firmados por miembros del HHMI superaban de lejos las de cualquier otra institución. Los trabajos del HHMI fueron citados 76.554 veces entre 1994 y 1999, más del doble que los realizados en la Universidad de Harvard, que con 37.118 citas ocupaba el segundo lugar de la clasificación general durante ese período. El mismo reportaje de *ScienceWatch* detallaba que nueve de los 15 autores con los artículos de mayor "índice de impacto", medido por el número de citas, eran investigadores del HHMI.

El mismo Cech ha escrito algunos de los artículos más mencionados. Los que demostraban que el ARN, material genético, puede tener propiedades enzimáticas —el hallazgo que le valió el premio Nobel— se están convirtiendo en clásicos. El descubrimiento del ARN enzimático, llamado también ribozima, ha abierto nuevas vías al estudio sobre el origen de la vida.

Antes de que Cech y Altman descubrieran las ribozimas (en el curso de experimentos que llevaron a cabo de manera independiente) creíase que el ARN se limitaba a leer la información contenida en el ADN de los genes de un organismo y a utilizarla para la síntesis de proteínas. Se suponía también que las proteínas eran las únicas moléculas que podían servir de enzimas para catalizar las reacciones bioquímicas, es decir, romper y recombinar compuestos. Pero Cech y Altman encontraron que los ARN aislados del protozoo ciliado *Tetrahymena* y de la bacteria *Escherichia coli* se podían empalmar entre sí *in vitro*, una función claramente enzimática.

El laboratorio de Cech se ha afanado también desde hace poco en el estudio de la telomerasa, una enzima que contiene ARN e impide que los telómeros —los extremos de los cromosomas— se encojan un poco cada vez que la célula se divide. La telomerasa y su función de mantenimiento de los telómeros se ha convertido en un tema candente de la investigación sobre el envejecimiento y en el que se centra el desarrollo de nuevas medicinas. Comparte la presidencia del HHMI con su trabajo investigador en un laboratorio de la Universidad de Colorado, entre cuyos frascos pasa unos cuantos días o una semana cada mes.

Cech era un prodigio de la ciencia ya de pequeño, aunque fue la geología su primer interés, no la biología. Recuerda que comenzó a coleccionar rocas y minerales en cuarto curso y que cuando llegó al instituto de Iowa City, donde creció, iba llamando a la puerta de los profesores de geología de la Universidad de Iowa, importunándoles con preguntas sobre meteoritos y fósiles.

Tras ser admitido en el Colegio Grinnell, relata, se asomó a la química física, pero pronto se dio cuenta de que "no tenía una capacidad de atención suficiente para la elaborada electrónica y fontanería" de la disciplina. Se pasó a la biología molecular y comenzó una trayectoria profesional que le llevaría del programa de doctorado de la Universidad de California en Berkeley a un puesto de profesor en la Universidad de Colorado, pasando por una estancia postdoctoral en el Instituto de Tecnología de Massachusetts.

En su calidad de presidente del HHMI, centra una de las prioridades esenciales en la bioinformática (también llamada biología computacional): el uso de los ordenadores para comprender los datos biológicos. "La bioinformática va a transformar de verdad la investigación biomédica y la asistencia sanitaria", predice. El HHMI ya ha financiado nuevas iniciativas apoyando a quienes recurren a la bioinformática para estudiar la estructura de moléculas biológicas, para modelizar el comportamiento de las redes de células nerviosas y para comparar enormes porciones de la información de la secuencia de ADN obtenidas gracias al Proyecto Genoma Humano. "Hace unos años los biólogos sólo utilizaban los ordenadores para escribir los artículos o para entretenerse. El ordenador llegó tarde a la biología, pero cuando llegó, vaya si lo hizo con fuerza".

Cech está también muy interesado en la bioética. Ha establecido una comisión asesora con el fin de ayudar a los investigadores del HHMI a elucidar algunos de los dilemas más espinosos de la biotecnología. La comisión, anticipa, se reunirá con los investigadores y desarrollará material didáctico. En lo que se refiere a la clonación, tiene sus propias ideas. La llamada clonación humana reproductiva —la generación de un embrión clonado y su implante en un útero para su desarrollo hasta el nacimiento— no les está permitida a los investigadores financiados por el HHMI, afirma. Pero la clonación para fines médicos, en la cual las células de un feto humano clonado se utilizarían para cultivar tejidos de repuesto para un individuo, "dependerá de la institución de acogida".

A grandes rasgos, Cech, que cuenta 53 años, se manifiesta como un personaje muy diferente de su predecesor en el HHMI, Purnell W. Choppin, que se retiró a finales de 1999 a la edad de 70 años. Mientras que el pulcro Choppin siempre vestía chaqueta y corbata, Cech prefiere jersey y camisa, sandalias y calcetines. Y si Choppin rara vez se detenía con el personal administrativo de las oficinas centrales del HHMI, Cech celebra cada mes una reunión social de una hora en el enorme atrio emparrado con flores. También anima a los investigadores del HHMI a asistir a las reuniones en las que comparten sus resultados con otros científicos acompañados de algún estudiante de doctorado. "Mi estilo personal —comenta— consiste en ser abierto y acogedor".

Economía española

El cálculo del IPC y sus efectos

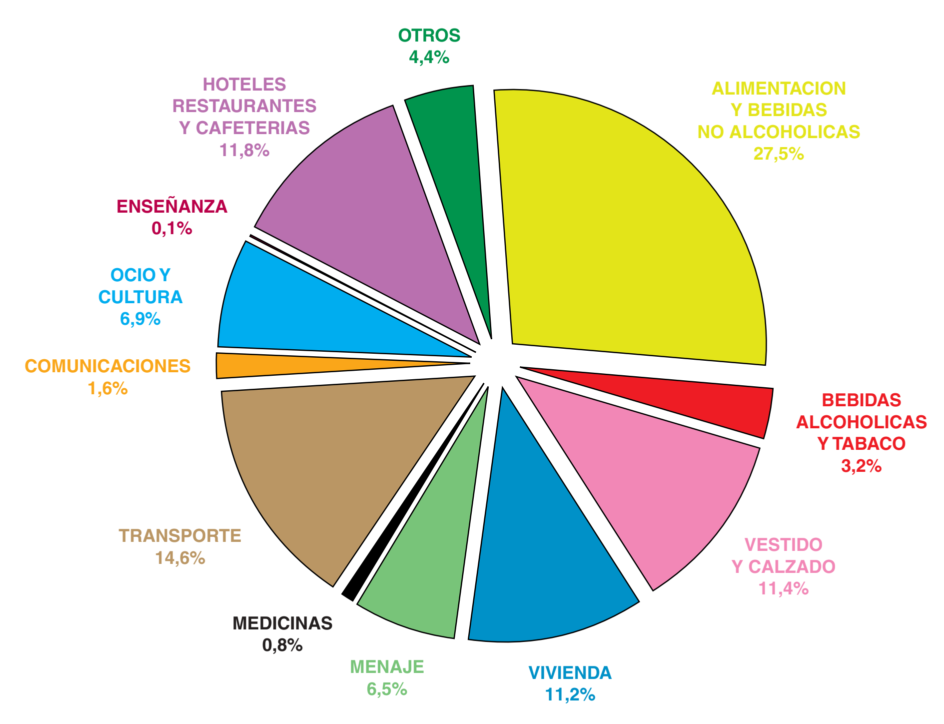
El cálculo del Indice de Precios al Consumo (IPC) es, sin duda, uno de los elementos clave en la política macroeconómica, debido a las importantes implicaciones que se derivan de su determinación. El proceso de cálculo, realizado por el Instituto Nacional de Estadística (INE) es extremadamente complejo. El IPC español se calcula cada mes a partir de 150.000 datos (una de las cifras más altas del mundo) que se recogen tres veces al mes, a partir de datos geográficamente muy desagregados que incluyen desde las grandes urbes hasta apartadas zonas rurales.

Es importante recalcar que el IPC no pretende ser un indicador real del coste de vida, sino que intenta medir la evolución a lo largo del tiempo de los precios de consumo que afectan a los hogares españoles. Su elaboración parte de la estructura de gasto de dichos hogares obtenida a partir de la Encuesta De Presupuestos Familiares (EPF), que permite definir una "cesta de la compra" convencional (estructura de consumo), que incluye 471 artículos genéricos.

En la actualidad el período base de referencia es el año 1992, con respecto al cual se mide la evolución de los precios, agregándola a través de una media ponderada de índices elementales que contienen la información de los distintos municipios, establecimientos y familias seleccionados, mediante la fórmula de Laspeyres (así llamada en honor del economista alemán Etienne Laspeyres, que ideó dicho índice).

Es evidente que las técnicas de elaboración del IPC responden a rigurosas pautas estadísticas, pero también que es posible realizar definiciones alternativas y más precisas para la medida de la inflación. En este sentido, el cálculo del IPC mediante una media ponderada simple puede permitirnos definir un IPC individual para cada uno de los hogares que forman parte del conjunto sobre el que se define el IPC general.

La relación entre el IPC general y los IPC individuales demuestra la existencia de una dispersión entre ambos, que puede estudiarse en función de las características específicas de los diversos grupos en que puedan clasificarse los hogares individuales (nivel de renta, comunidad autónoma, grado de formación, etcétera).



Ponderaciones del índice de precios al consumo armonizado de la Unión Europea

Este problema ha sido analizado muy recientemente en dos informes de especial relevancia. Así, en 1996, el Informe Boskin, encargado por el Comité de Finanzas del Senado en EE.UU., se planteó por primera vez la existencia de desviaciones o sesgos entre el IPC oficial y los IPC considerados desde el punto de vista individual, en función de variables tales como: la consideración idéntica de todos los hogares con independencia de su nivel económico, la existencia de cambios en la calidad de los productos, la ubicación territorial y otros. De acuerdo con las conclusiones del informe, los expertos estimaron que el IPC estadounidense estaría sobrevalorando la inflación en un 1,1 % anual, en un rango de valores que iría del 0,8 al 1,6 %.

Basándose en la metodología del Informe Boskin, los profesores Ruiz-Castillo, Ley e Izquierdo han realizado un completo estudio editado por la Caixa en 1999. A partir de un análisis en profundidad de los datos individuales del IPC obtenido por el INE, y utilizando las hipótesis de partida empleadas por Boskin, han estimado que el IPC oficial podría estar sobrevalorando la inflación española en torno a un 0,6 % anual. La variabilidad observada en la inflación individual, medida como "sesgo del subgrupo" (tasa de inflación oficial – tasa de inflación del subgrupo), demuestra que los efectos de la inflación están lejos de ser neutrales. Así, por ejemplo, la tasa de inflación oficial ha subestimado en un 0,74 % anual la inflación de Baleares, mientras que ha sobrestimado en un 0,26 % la de Aragón. Por el mismo motivo, la inflación oficial ha perjudicado a los habitantes de las grandes ciudades y a los niveles más elevados de renta, beneficiando a los pueblos pequeños y a los niveles más bajos de renta. En definitiva cabría plantearse la existencia de diversos índices por subgrupos, si deseamos conocer mejor los efectos reales de la inflación.

La existencia del sesgo general del 0,6 % de sobrevaloración anual de la inflación es un hecho a tener muy en cuenta ya que, en una economía moderna, la tasa de incremento de los precios es la referencia fundamental en la determinación de numerosas variables esenciales: salarios, pensiones, alquileres, etcétera. A este respecto conviene recordar que únicamente considerando la adaptación de las pensiones al IPC cada décima de desviación supone un incremento de coste de 15.000 millones de pesetas.

Este efecto es especialmente preocupante en el ámbito de la negociación colectiva, ya que en España casi siete millones de trabajadores se ven afectados por convenios sectoriales, en los cuales la evolución previsible del IPC se convierte en elemento básico de cara a la evolución salarial. A este respecto conviene aclarar que el INE se limita a realizar las valoraciones del IPC, mientras que sus previsiones de futuro son realizadas directamente por el gobierno. En cualquier caso, como buena parte de los convenios contemplan adaptaciones a la inflación real, el cálculo del IPC por parte del INE sigue siendo un elemento esencial en todo el proceso.

Para este año 2001 el INE está preparando un nuevo IPC modernizado, armonizado con los países de la zona euro y con un cambio del año base de cálculo. El nuevo proceso permite una mayor frecuencia de actualización, para adaptarse a los cambiantes hábitos de consumo de los ciudadanos. Es evidente, por ejemplo, que cada vez se gasta menos en alimentación y más en telefonía e informática, y no sólo porque cambien los precios, sino porque los hábitos de consumo se modifican.

En este sentido, y aprovechando la coyuntura favorable que ofrece la próxima modificación del IPC, consideramos que sería momento especialmente adecuado para introducir algunas mejoras técnicas de consideración, de entre las cuales destacaríamos la publicación de índices diversos para distintos subgrupos, lo que permitiría definir con precisión el sesgo sobreinflacionista, y determinar con mayor rigor las consecuencias distributivas del IPC en función de la metodología del INE y de las medidas adoptadas por el gobierno.

JUAN F. CORONA
Catedrático de Economía Aplicada
Universidad Internacional
de Cataluña

Invento “prehistórico” en pleno siglo XXI

La doble vasija

Por fabricar un innovador sistema de refrigeración confeccionado con barro cocido, para conservar alimentos perecederos en países en vías de desarrollo de clima árido, la Fundación Rolex le concedió uno de sus premios del año pasado a Mohammed Bah Abba, un profesor de 36 años. Tremenda paradoja de la técnica de nuestro tiempo, que ve ya en el horizonte redes íntegramente fotónicas, como las adelantadas en los artículos dedicados a la cuestión en este mismo número de la revista, y enriquece a la población más desvalida con invenciones que se dirían prehistóricas.

El norte de Nigeria es una región paupérrima que malvive con agricultura de subsistencia. En sus chozas sin fluido eléctrico, los alimentos se echan a perder por falta de neveras. Sin frigoríficos, los campesinos pierden ingresos al no poder almacenar las hortalizas, que deben vender el mismo día de su recogida. Ante ese problema apremiante, Mohammed Bah Abba dio con el feliz invento de la doble vasija, un mecanismo de refrigeración sumamente simple y barato. La materia prima, barro cocido.

La alfarería está profundamente arraigada en la cultura africana. Las vasijas de barro cocido se siguen empleando como utensilios de cocina, recipientes de agua, ataúdes, arcones o huchas. Pero van dejando paso a los bidones de lata y plástico. Bah Abba, nacido en un medio rural, se familiarizó con el torno del alfarero y conoció la capacidad de la arcilla cocida para guardar el agua potable sin degradarse. Supo también de las penalidades de las mujeres del campo que debían acudir diariamente al mercado a vender lo que daba la tierra, so pena de perder su menguada fuente de ingresos. (Esa otra componente humanitaria es también valorada en los premios Rolex a la Iniciativa.)

El sistema ideado por Bah Abba consta de dos vasijas, de distinto diámetro, incluida una en otra. El espacio que media entre ambas, se rellena con arena, que debe mantenerse constantemente empapada para asegurar la humidificación de sus paredes. Las frutas, hortalizas y demás alimentos se colocan en la vasija interior. La explicación física del proceso de refrigeración que opera es muy sencilla: el agua contenida en la arena que separa ambas vasijas se evapora hacia la parte exterior de la vasija mayor, ventilada por la circulación del aire seco del exterior. El proceso de evaporación comporta, por termodinámica, una reducción de varios grados de la temperatura de la arena, lo que enfría la vasija interior, destruye los agentes de la descomposición y conserva los alimentos. Gracias a ese sencillo método, la conservación de berenjenas, por ejemplo, pasó de tres a 27 días, y la de tomates y pimientos, a tres o más semanas.



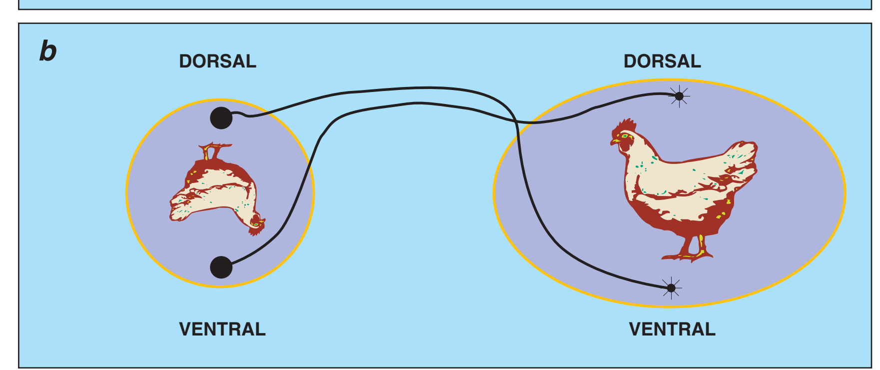
Mohammed Bah Abba explicando el funcionamiento de la doble vasija

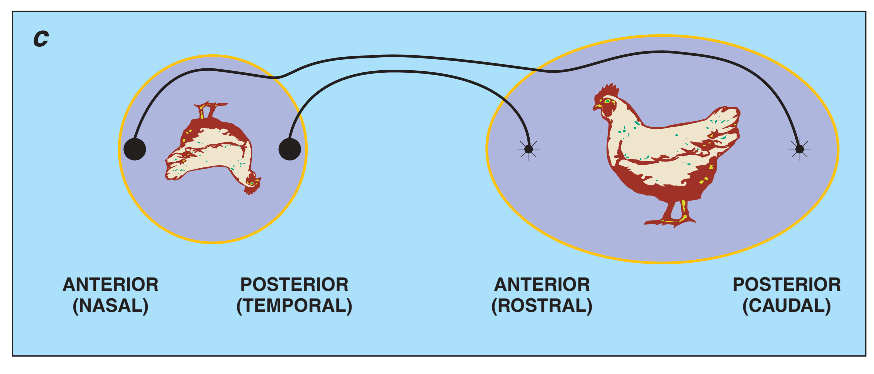
Comunicación celular

Transducción de señales nerviosas

Dicta un principio fundamental del proceso de ensamblaje de los circuitos nerviosos de los organismos superiores que las proyecciones axonales que migran de una región a otra remota acostumbran organizarse según mapas topológicos. Los axones de las neuronas agrupadas en determinadas regiones se proyectan hacia neuronas igualmente agrupadas en el tejido diana, con las que acabarán por interaccionar. Se consigue así mantener una organización espacial similar.

Tenemos un ejemplo claro de esta regionalización en el sistema visual de los vertebrados. La información visual captada en la retina se transfiere al cerebro a través de los axones de las neuronas que constituyen el ganglio retiniano. Estos axones se proyectan hacia el tecto óptico del cerebro. Las proyecciones que se distribuyen a lo largo del tecto generan un mapa topográfico similar al que se forma en la retina, aunque invertido.





1. Las proyecciones de las neuronas desde la retina hasta al tecto óptico se hacen a través de una distribución topográfica. El mapa de organización visual que se configura en el tecto óptico está invertido con respecto al que se forma en la retina (panel A). *Ello es debido a que las proyecciones axonales de la región dorsal de la retina inervan la región ventral del tecto óptico, y las provenientes de la región ventral las correspondientes a la región dorsal del tecto óptico* (panel B). *Las regiones anteriores* (nasal) *y posteriores* (temporal) *se proyectan hacia las regiones posteriores y anteriores, respectivamente, del tecto óptico* (panel C)

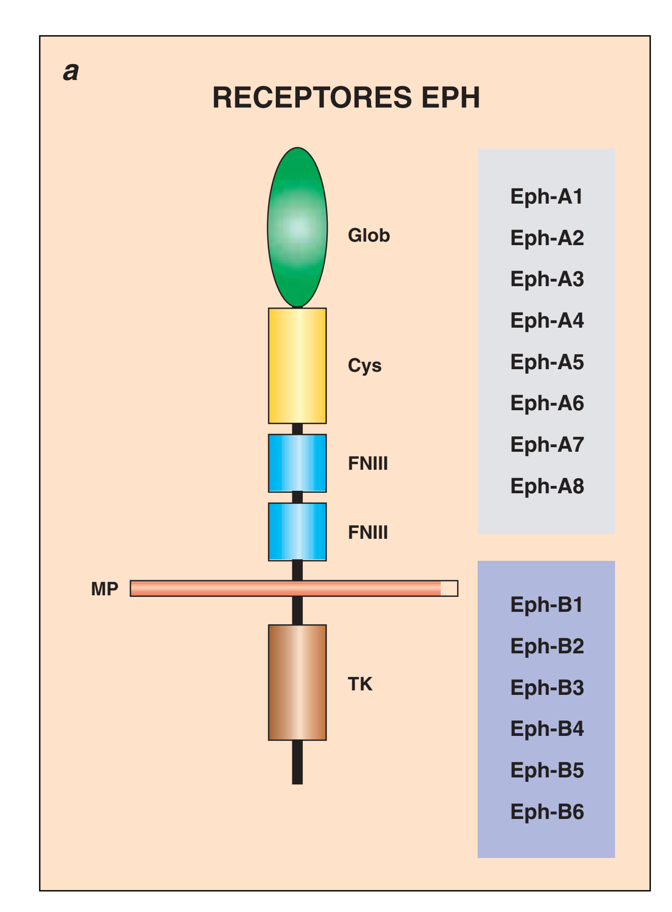
El proceso de la construcción de la red neuronal en general y de los mapas topográficos en particular, durante el desarrollo embrionario, requiere un control muy riguroso. Durante el proceso, muchos miles de grupos de axones se proyectan, cruzando largos territorios, desde sus lugares de origen hasta sus tejidos diana. Una vez allí, deben primero reconocer sus correspondientes células diana, para luego conectarse con ellas, y generar el mapa correcto de conexiones.

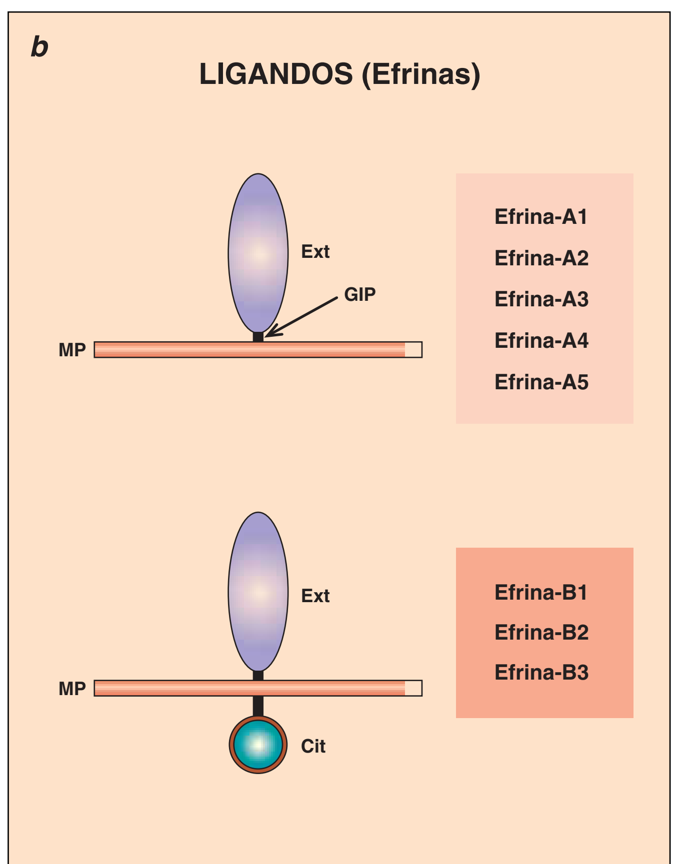
La existencia de estos mapas topográficos fue postulada por R. W. Sperry hace más de 50 años. Proponía que la organización de las proyecciones nerviosas entre la retina y el tecto óptico estaban gobernadas mediante un conjunto de señales citoquímicas complementarias. De acuerdo con dicho modelo, durante el desarrollo del sistema visual las neuronas retinianas y sus axones adquirirían marcadores citoquímicos, que permitirían que los axones navegaran hasta su destino en el tecto óptico y reconocieran a sus células diana, gracias a que éstas expresarían igualmente un conjunto de señales citoquímicas, complementarias con las existentes en los axones retinianos.

Sperry postulaba, además, que los marcadores se expresarían constituyendo gradientes a lo largo de los ejes anteroposterior y dorsoventral. De esta forma, la superimposición de varios tipos de marcadores y la distribución diferencial derivada de los gradientes ayudarían a definir mapas topográficos con valores específicos de longitud y latitud.

El modelo de "quimioafinidad" de Sperry resultó ser correcto en líneas generales. Se ha confirmado la existencia de moléculas que se distribuyen de manera gradual en la retina y a lo largo de los ejes anteroposterior y dorsoventral del tecto óptico. Algunas de esas moléculas mostraron, en experimentos *in vitro*, la propiedad de atraer o repeler a varios tipos de axones retinianos.

Hasta hace unos años no se determinó la estructura molecular de algunas de esas señales "citoquímicas". Dos grupos de investigación, uno en Alemania y otro en Estados Unidos, identificaron dos moléculas que se expresaban constituyendo gradientes anteroposteriores a lo largo del tecto óptico. Pertenecían a una familia de proteínas que se encuentran asociadas a la membrana plasmática y funcionaban como ligandos de una familia de receptores con actividad





2. *Nomenclatura y estructura molecular de los receptores EPH y de sus ligandos* (efrinas)

quinasa, denominados receptores EPH. Posteriormente, se comprobó que, al igual que sus ligandos, la mayoría de los receptores EPH se expresan en el sistema nervioso, constituyendo gradientes en muchos casos.

La familia de los receptores de tirosina quinasa (TK) consta de un gran número de proteínas de membrana que transmiten al interior celular señales externas y desempeñan un papel importante en la regulación de los procesos de proliferación y diferenciación celular durante el desarrollo embrionario.

Todos los receptores TK comparten una estructura globular similar, consistente en una región extracelular, responsable de la fijación de su ligando, una región hidrofóbica, responsable de su anclaje en la membrana plasmática, y una región citoplasmática, que contiene el dominio catalítico de la enzima tirosina quinasa.

Cuando el receptor interacciona con su ligando, el dominio catalítico se "activa" y desencadena una cascada de señales. Arranca ésta con la autofosforilación del receptor (en el aminoácido tirosina), continúa con la fosforilación de proteínas citoplasmáticas (sustratos) y culmina con la activación de proteínas nucleares que, en última instancia, serán las responsables de promover la respuesta de la célula. Entre los ejemplos típicos de receptores TK se citan el receptor de la insulina y los receptores del factor de crecimiento epidérmico (EGF) y del factor de crecimiento para las células nerviosas (NGF).

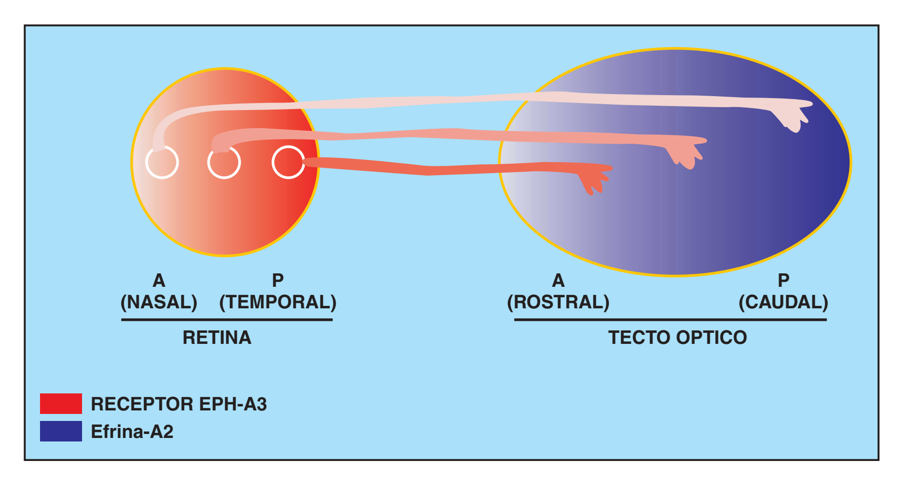
Los receptores EPH representan el mayor y más complejo subgrupo dentro de la superfamilia de los receptores de tirosina quinasa. Aunque todos los receptores EPH tienen la misma estructura globular, típica de todos los receptores TK, éstos han podido clasificarse en dos grupos (A y B) según los diferentes niveles de similaridad que presentan sus regiones extracelulares. Esta región, responsable de interaccionar con los ligandos, consta de una estructura modular de tres tipos de dominios, presentes también en otras proteínas de membrana implicadas en procesos de comunicación celular.

Los ligandos que interaccionan con los receptores EPH se llaman efrinas y se agrupan en dos clases estructuralmente diferentes. Así, la clase A (efrina-A) carece de dominio intracelular, y se ancla en la membrana plasmática a través de un enlace "glicosil inositol fosfato". La clase B (efrina-B) contiene una región citoplasmática y se inserta en la membrana.

La separación de ambos, receptores EPH y sus ligandos, en dos clases refleja no sólo diferencias estructurales, sino también preferencias de interacción. Los receptores de la clase A (EPH-A) fijan ligandos de la clase A (efrina-A); los receptores de la clase B (EPH-B), sólo ligandos de la clase B (efrina-B). Esta selectividad de interacción se da entre clases, pero dentro de cada una (clase A o B) se aprecia mayor promiscuidad.

Cada receptor puede fijar más de un ligando (EPH-A2 interacciona con las efrinas A1, A2 y A3) y cada ligando puede activar a más de un receptor (la efrina-B2 puede interaccionar con los receptores EPH-B1, B2, B3 y B4).

Para que esta interacción sea fisiológica —se active el receptor—, los ligandos han de permanecer fijados a la membrana plasmática. Lo que exige que la interacción "Receptor



3. Ejemplo de la distribución topográfica de axones retinianos que expresan el receptor EPH-A3 a lo largo del eje antero-posterior del tecto óptico. El receptor EPH-A3 se expresa en la retina en una distribución en gradiente (color rojo) *a lo largo del eje antero-posterior* (nasal-temporal). *Las neuronas que se sitúan a lo largo de este eje expresan en sus axones diferentes niveles del receptor. Su ligando* (efrina-A2)*, que se manifiesta en el tecto óptico, también se distribuye y forma un gradiente* (color azul). *Los axones que expresan el receptor EPH-A3 se proyectan de la retina a diferentes sitios del tecto óptico, dependiendo del nivel de concentración de su ligando* (efrina-A2) *que encuentren a lo largo del eje antero-posterior* (rostral-caudal) *del tecto. Se trata de una relación inversa, pues cuanto mayor sea el nivel de expresión del receptor en los axones* (gradiente de color rojo)*, menor será el nivel de ligando que reconoce en sus células diana* (gradiente de color azul)

EPH-efrina" se establezca a través de dos células adyacentes que expresan en sus membranas plasmáticas las correspondientes moléculas (ligando y receptor).

La mayoría de los receptores EPH y sus ligandos se expresan en diversas áreas del sistema nervioso. En muchos casos ambos, ligando y receptor, aparecen en gradientes complementarios tanto en las regiones donde se localizan las neuronas que están proyectando sus axones, como en sus tejidos diana. Un ejemplo de ello se observa durante el desarrollo del sistema visual del pollo. En este sistema retinotectal, el receptor EPH-A3 se expresa en las neuronas retinianas en una distribución en gradiente a lo largo del eje anteroposterior (nasal-temporal). Los axones de estas neuronas se proyectan en diferentes regiones del tecto óptico.

El destino final de tales axones dependerá del nivel de concentración de sus ligandos (Efrina-A2) en las células que encuentran a su paso, a lo largo del eje anteroposterior (rostral-caudal). En este caso, la relación es inversa: los axones que expresan un menor nivel del receptor (provenientes de la zona anterior de la retina) reconocen e inervan en el tecto óptico a células con altos niveles de su correspondiente ligando, que se sitúan ahora en la región posterior. Cuanto mayor sea el nivel de expresión del receptor en los axones, menor será el nivel de ligando que reconoce en sus células diana.

La interposición de varios de estos gradientes de expresión complementarios permite generar mapas topográficos con un mayor nivel de resolución y, por tanto, mayor y más precisa es la cantidad de información topológica que se transmite de la retina al cerebro.

La demostración *in vivo* de la función de los receptores EPH y de sus ligandos en los procesos de migración axonal y de generación de mapas topográficos se ha producido gracias a experimentos genéticos realizados en el ratón. Mediante técnicas de recombinación génica, se han inactivado los genes que determinan algunos receptores EPH y sus ligandos. Los ratones mutantes para algunos de estos genes han mostrado graves defectos en las proyecciones axonales, poniendo de manifiesto la importancia de estas señales en la organización topológica del sistema nervioso.

Queda por averiguar el proceso mediante el cual la interacción de los receptores EPH con sus ligandos determina un efecto concreto en la célula. Así, aunque se sabe que la interacción ligando-receptor dispara la fosforilación del receptor, conocemos muy poco de los procesos subsiguientes. A diferencia de la mayoría de los receptores tirosina quinasa, la activación de los receptores EPH no produce una señal mitogénica (división celular); se produce, por contra, una modificación morfológica de la célula en virtud de la reorganización del citoesqueleto.

Dado el elevado número de receptores EPH y de sus ligandos, y la aparente promiscuidad en sus interacciones, será aún necesario un gran número de experimentos para determinar cómo a través de estas moléculas el organismo genera complejos mapas topográficos en diferentes regiones del sistema nervioso.

DIEGO PULIDO
Centro de Biología Molecular
"Severo Ochoa", Madrid

Industria textil

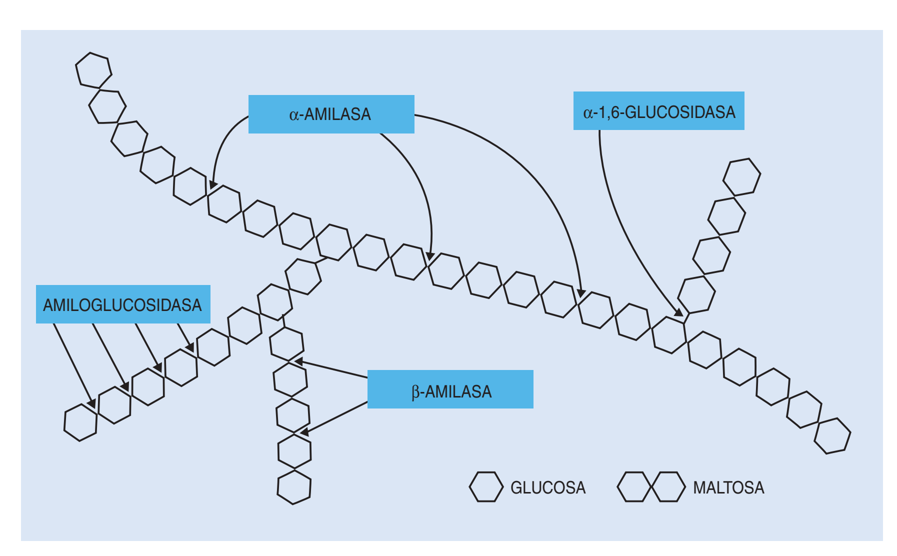
Biocatalizadores

Desde muy antiguo se han venido aplicando procesos bioquímicos a la preparación de las materias textiles para su manufactura posterior. Los egipcios utilizaban ya el enriado del lino para separar de los haces de fibras la parte leñosa del tallo.

El ennoblecimiento de las materias textiles atraviesa las etapas de blanqueo, tintura, estampación y acabado; en cada una intervienen productos contaminantes, a saber, ácidos minerales, oxidantes, álcalis y otros. No menos lesivos para el entorno son los subproductos que originan. Para paliar ese daño potencial se investigan biocatalizadores orgánicos, enzimáticos.

Podemos resumir en dos categorías principales las enzimas de uso en la industria del ennoblecimiento textil. Las que actúan sobre determinados recubrimientos o aprestos de los manufacturados textiles sin alterar la fibra y las que producen un ataque a la fibra modificando su superficie o incluso destruyéndola. Ejemplo de las primeras son las α-amilasas, que licúan los almidones y féculas sin alterar la celulosa. Pertenecen al segundo grupo las celulasas.

El algodón es la fibra celulósica más importante. Consta de un 88 a



Acción de los diferentes componentes de las amilasas sobre los almidones y féculas

un 96 % de celulosa; el resto se lo reparten pectinas, ceras, pigmentos, sales minerales y proteínas, que es necesario eliminar para una correcta aplicación de los procesos de tintura, estampación y acabado. La celulosa esta constituida por β-celobiosa; en su microestructura se detecta la presencia de zonas cristalinas y amorfas, siendo estas últimas las atacables por celulasas.

Para eliminar los aprestos amiláceos de los hilos y facilitar su tejeduría se procede al desaprestado. Por ingeniería genética se han introducido modificaciones en la estructura de las amilasas, de suerte que se incremente la velocidad de licuefacción de almidones y féculas y se desarrollen los procesos de desencolado de forma discontinua o continua a altas temperaturas. Las α-amilasas producen una rápida fragmentación de la molécula del almidón en dextrinas solubles en agua caliente, mientras que las β-amilasas actúan separando moléculas de maltosa de los extremos de la cadena del almidón, por lo que su acción licuante es más lenta.

Mediante las operaciones siguientes de descrudado y blanqueo se limpian las impurezas naturales de la fibra de algodón. En el descrudado se obtiene una buena hidrofilidad y un determinado aclaramiento del color y en el blanqueo se acaba de mejorar su hidrofilidad y su grado de blanco. La investigación sobre el descrudado del algodón se ha centrado en la aplicación de pectinasas y celulasas. Las pectinasas degradan la pectina, polímero del ácido galacturónico con diversos glucósidos neutros en sus cadenas laterales.

Dado que las pectinasas no producen un descrudado muy persistente en medio acuoso, ni siquiera en presencia de tensoactivos, se ha abordado su empleo en medio no acuoso, isooctano, mediante un sistema micelar inverso en presencia de un tensoactivo no iónico. Por esta vía se podría lograr un descrudado similar al alcalino, con menos tiempo y temperatura, pero queda por resolver la recuperación del disolvente.

Las celulasas, de reconocida eficacia en el descrudado del algodón, presentan el inconveniente de que pueden producir una hidrólisis de la celulosa con la consiguiente pérdida de resistencia. Las celulasas tienen una acción catalítica específica sobre el enlace 1,4β-D-glucósido del polímero de la celulosa. Las celulasas, un sistema enzimático múltiple, se componen, al menos, de una mezcla de 4-endogluconasas, que hidrolizan al azar la cadena de la celulosa, celobiohidrolasas, que separan celobiosa de los finales de la cadena de la celulosa, y celobiasa, que hidroliza la celobiosa en glucosa.

Para introducir procesos enzimáticos en el blanqueo del algodón se confía en la glucosa oxidasa, que, gluconolactona mediante, produce ácido



D-glucónico. Se caracteriza éste por su buen poder secuestrante (Fe^{3+}, Mg) y estabilizador en el blanqueo con peróxido de hidrógeno. La β-D-glucosa puede obtenerse como un subproducto del proceso de desencolado con α-amilasa. En este sistema, el blanqueo se realiza en condiciones alcalinas, a 95 ºC y durante 1 hora sin atacar a la celulosa. Resulta un blanco óptimo.

En el acabado de los tejidos de fibras celulósicas, algodón, viscosa, modal o lyocell, se emplean celulasas. Según el efecto de acabado deseado se opta por las celulasas que contienen todos los componentes o por las 4-endogluconasas. Las primeras limpian la superficie de la fibra y las segundas desfibrilan la superficie.

Existen diversos tipos de acabados. El llamado *delavé* consiste en eliminar de la superficie de un tejido teñido con índigo, colorantes reactivos o sulfurosos, una determinada proporción de fibra existente en la superficie. El efecto uniforme de la tintura queda así algo desfigurado, dando a la prenda confeccionada un aspecto de usada, el demandado en los "tejanos". El acabado *biopulido* se caracteriza por una eliminación completa de la fibra superficial, con lo cual se obtiene una mayor viveza de los colores y un tacto más fresco. Por último, en el acabado *piel de melocotón* se eliminan las fibras superficiales largas, no las cortas, para que el tejido adquiera un tacto suave, parecido al de la fruta que le da su nombre.

JOSÉ CEGARRA
Universidad Politécnica de Cataluña
Tarrasa

Drogadicción

Sustratos neurobiológicos

La adicción a las drogas constituye una enfermedad del cerebro que se presenta en individuos susceptibles como consecuencia de determinados cambios celulares y moleculares en la función del sistema nervioso. El sistema dopaminérgico mesolímbico es uno de los circuitos cerebrales que median las acciones psicológicas y conductuales de las drogas de abuso. En tales circuitos se apoyan las hipótesis moleculares que explican los fenómenos de dependencia, tolerancia, sensibilización y síndrome de abstinencia.

La morfina y la heroína, drogas opiáceas, se vienen empleando en medicina desde la antigüedad por su potencia analgésica para aliviar el dolor, si bien su uso queda ahora limitado a enfermedades terminales, ya que producen adicción. De acuerdo con nuestras investigaciones, las propiedades analgésicas pueden disociarse de las adictivas o placenteras vinculadas a estas drogas. Ello comporta una nueva aproximación farmacológica para el tratamiento del dolor y el control de la drogadicción.

El receptor NK1 de la sustancia P (SP) está intensamente expresado en áreas cerebrales de la ruta mesolímbica. (SP es un neurotransmisor/neuromodulador que se libera por las fibras nerviosas.) La ruta mesolímbica está implicada en las propiedades placenteras asociadas no sólo a las recompensas naturales (agua, comida y sexo), sino también a la administración de drogas de abuso.

Con el fin de estudiar si la SP está implicada en los efectos motivacionales y adictivos producidos por la morfina hemos preparado ratones transgénicos carentes del gen que determina el receptor NK1. Los animales homocigotos para la mutación NK1 se desarrollan, reproducen y presentan respuestas analgésicas tras la administración de morfina, similares a los de los animales silvestres, no mutados. Por contra, los individuos homocigotos no experimentan los efectos de "recompensa" tras la administración de morfina que aparecen en los silvestres.

Para evaluar tales efectos de recompensa, considerados el equivalente al "placer" producido por morfina y heroína en humanos, se recurre al ensayo de condicionamiento de plaza, basado en el procedimiento de condicionamiento pavloviano. Así, la administración de una droga se asocia a un determinado ambiente.

El aparato consta de dos compartimentos sensorialmente distintos (paredes y suelo de rayas con suelo liso, puntos con suelo de rejilla). El animal aprende a asociar un estímulo de recompensa positiva o negativa con un determinado compartimento. Cuando se le ofrezca luego la posibilidad de elegir entre compartimentos, entrará, explorará y permanecerá en el que obtuvo experiencias placenteras o de recompensa positivas (morfina, cocaína, comida); no visitará dicho compartimento si durante el condicionamiento recibió recompensas negativas (naloxona).

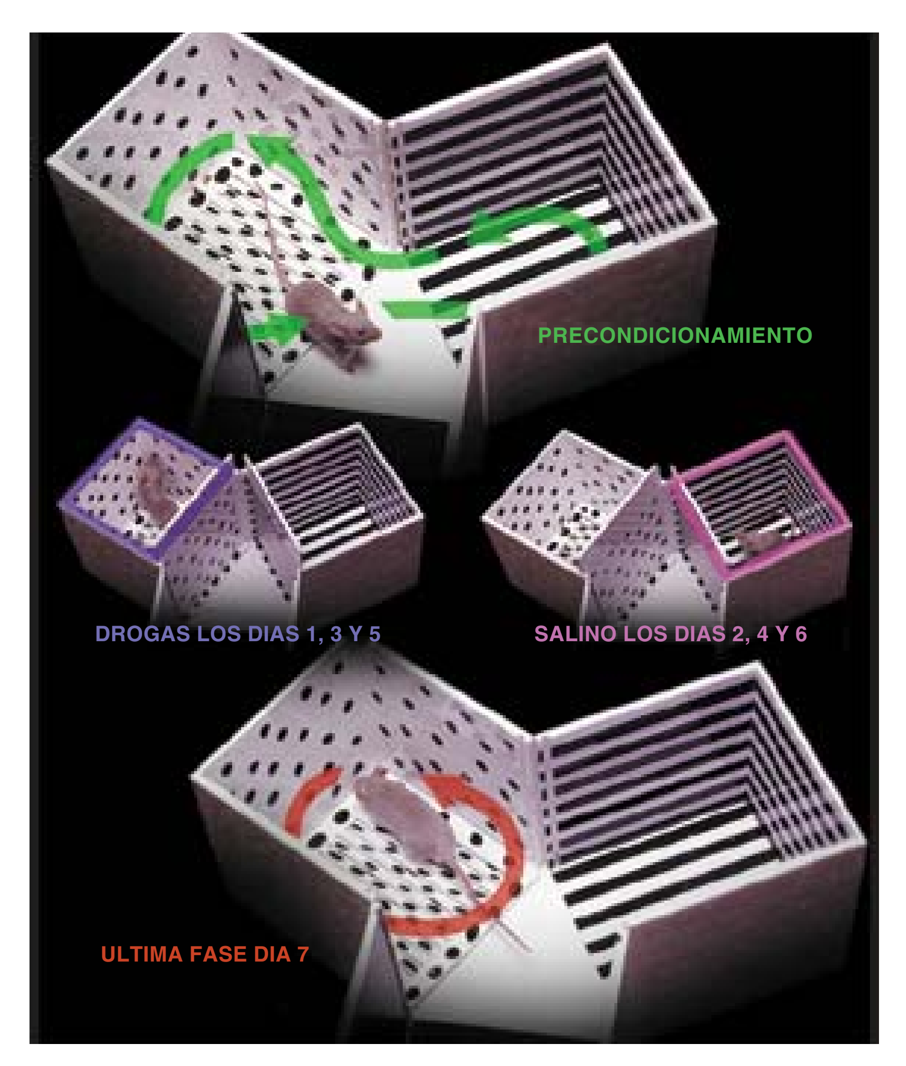
Guiados por este planteamiento, hemos establecido que la ausencia del receptor NK1 en ratones mutantes produce la desaparición de efectos de recompensa de morfina sin modificar los ejercidos por cocaína o los de la comida (una recompensa natural).

A tenor de los datos obtenidos, la modulación de circuitos cerebrales por la sustancia P es esencial para el establecimiento de los efectos recompensantes o "euforizantes" de morfina. ¿Es también necesaria la SP para que tenga lugar la recompensa negativa asociada al síndrome de abstinencia? En animales dependientes de morfina la administración de naloxona, un antagonista opiáceo, induce rápidamente el síndrome de abstinencia, efecto que puede utilizarse como recompensa negativa en el ensayo. Los animales mutantes no sólo presentan una importante disminución en el síndrome de abstinencia, sino que además no muestran aversión por el compartimento donde se les precipitó el síndrome. Estos resultados indican que los individuos homocigotos no detectan ni los efectos placenteros de morfina ni los efectos adversos de su carencia cuando son adictos.

Cabría, en principio, atribuir estas alteraciones psicobiológicas a cambios en el número, afinidad o distribución de los receptores opioides o de los receptores dopaminérgicos. Sin embargo, mediante inmunocitoquímica, ensayos de unión de 3H-agonistas a homogeneizados cerebrales, medida de la actividad adenilatocliclasa y producción de AMPc e hibridación *in situ*, hemos demostrado que estos parámetros son similares en los animales mutantes y silvestres.

La adicción a la morfina y heroína tiene consecuencias sanitarias, sociales y económicas devastadoras, pero estos resultados abren la puerta a esperanzadoras aproximaciones para el tratamiento del dolor, la adicción a opiáceos y la prevención de reincidencias tras la cura de desintoxicación, ya que aportan pruebas de que la sustancia P interviene en los mecanismos de recompensa de estas drogas, su adicción y abstinencia.

Así, la coadministración de fármacos antagonistas del receptor NK1 y morfina permitiría tratar el dolor intenso sin el riesgo de inducir dependencia de la droga. Además, la administración de antagonistas NK1 serviría para reducir la severidad del síndrome de abstinencia en enfermos adictos sometidos a cura de desintoxicación y para disminuir el riesgo de reincidencia.



Ensayo de condicionamiento de plaza. El ensayo consta de tres fases. En la primera, de precondicionamiento, el animal circula libremente por los dos compartimentos durante 18 minutos. Se registra el tiempo de estancia en cada uno de ellos, valor que revela la preferencia no condicionada del individuo por los compartimentos. La segunda fase, de condicionamiento, dura seis días; consiste en la administración de una recompensa (droga o comida, los días 1, 3 y 5) en un compartimento (por ejemplo, puntos/suelo de rejilla) y la administración de salino en el otro compartimento (rayas/suelo liso, los días 2,4 y 6), confinando al animal durante 20 minutos en cada una de ellas. Aprende a asociar estímulo y ambiente. La última fase, de ensayo, se realiza el día 7 y es similar a la fase de precondicionamiento, obteniéndose los tiempos que el animal pasa en cada compartimento después del condicionamiento

Nuestras investigaciones descubren también las bases moleculares que respaldan la hipótesis de que la drogadicción no es una característica subjetiva de la personalidad, sino una enfermedad que puede tratarse. Sabemos que en los procesos de motivación y recompensa participan dos circuitos cerebrales íntimamente relacionados. Uno ligado al "deseo" o la motivación por obtener una recompensa, como comida, agua, sexo o droga; y otro que crea la percepción de placer asociada a "comerlo o disfrutarlo".

Los opiáceos naturales del cerebro —las endorfinas— están implicados en el segundo circuito. Las endorfinas controlan las sensaciones placenteras de la comida y el orgasmo. La morfina y la heroína secuestran el circuito opioide para generar euforia ("el flash").

Sin embargo, como el "deseo" y el placer de "disfrutarlo" están controlados por diferentes circuitos cerebrales se corre el riesgo de que se desconecten uno del otro. Así ocurre en la drogadicción; los adictos desean más y más droga, pero el placer que obtienen de su consumo se reduce progresivamente. Ello se debe a una remodelación de los circuitos cerebrales, inducida por la droga.

Cuando se inyecta morfina se sobrestimula el circuito opioide. La única forma en la que el cerebro puede compensarlo es remodelando sus circuitos. Pero ahora estos circuitos cerebrales remodelados demandan más droga para satisfacer sus niveles anormales de actividad. Tal es el cerebro de un drogadicto. Cuando cesa la administración de la droga, el adicto presenta síndrome de abstinencia, una situación dolorosa y angustiosa que le aterra y procura evitar.

Aun cuando el drogadicto supere esa fase, existe siempre un alto riesgo de recaída. Que el cerebro sea plástico (de otra forma no podríamos aprender cosas, oficios, etc., durante la vida adulta) no significa que sea elástico; no recupera su estado inicial cuando se elimina la droga.

El estrés podría constituir uno de los factores que empuja al individuo desintoxicado a la reincidencia. Pues bien, de nuestra investigación se desprende la implicación de la sustancia P en la coordinación de la respuesta al estrés en caso de peligro; los animales mutantes carecen de analgesia inducida por estrés y agresividad territorial. Por ello, los antagonistas NK1 podrían reducir los niveles de estrés del paciente y ayudar a erradicar la drogadicción.

Si enfermedades tan dispares como la depresión, la ansiedad y la adicción están, al menos en parte, bajo el control del mismo sistema de sustancia P, podría darse una predisposición del individuo a sufrir tales patologías. Sabemos que la exposición a situaciones de estrés durante la infancia predispone a la drogadicción y la depresión en la vida adulta. Las presiones ambientales sobre un cerebro inmaduro podrían alterar los circuitos de sustancia P, de forma que el niño pueda soportarlas y, a la vez, hacerlos vulnerables a sufrir alteraciones de conducta en la vida adulta, cuando reaparezcan los agentes estresantes. Estos mismos cambios operarían en el "cerebro adicto"; las situaciones de estrés posteriores a la cura inducirían la recaída en el consumo de drogas.

CARMEN DE FELIPE
PATRICIA MURTRA
Instituto de Neurociencias
Universidad Miguel Hernández
San Juan, Alicante

De cerca

Texto y fotos: Josep Lloret

La pesca perfecta



1. Estudio de la edad de los peces mediante la lectura de anillos de crecimiento en los otolitos (pequeñas estructuras de carbonato cálcico y proteína ubicadas en el oído interno). En la foto se muestran los 10 anillos de una sección de otolito de platija (Hippoglossoides platessoides) *correspondientes a un individuo de 10 años de edad*

Si, según los patrones del cine, la tormenta perfecta es la combinación de un huracán y un drama familiar, la pesca perfecta sería, según la metodología científica, la que integrara el estudio continuado de la actividad pesquera y la gestión adecuada de la misma. En la actividad pesquera deben considerarse las poblaciones de peces (biomasa, abundancia, edad, maduración sexual, condición, etc.), los factores ambientales que influyen sobre las poblaciones, la propia flota y los pescadores. Por su parte, la gestión, adaptada a la población, debe velar por su conservación de acuerdo con la investigación científica.

La diversidad de especies y poblaciones explotadas constituye una dificultad añadida. No hay una sola especie o población cuyos parámetros biológicos y los de su entorno sean iguales. Los bacalaos (*Gadus morhua*) de la población de Georges Bank (NE Canadá), por ejemplo, se desenvuelven en una temperatura promedio anual de 8 ºC y alcanzan la madurez sexual al cabo de dos años de vida cuando pesan cerca de 2 kg. Sin embargo, los bacalaos de la población de Labrador-Grand Banks (SE Canadá) medran en una temperatura promedio anual de sólo 2 ºC y maduran sexualmente a los siete años de edad, cuando también pesan aproximadamente 2 kg. Mientras que la temperatura influye sobre el reclutamiento, crecimiento y condición del bacalao atlántico, el reclutamiento del boquerón (*Engraulis encrasicolus*) en el Golfo de León y en el Adriático viene condicionado por las aportaciones fluviales de los ríos Ródano y Po, respectivamente.

Además de las características biológicas y ambientales, el guión de una pesca perfecta debe contemplar también el carácter de la actividad pesquera. En algunas zonas se practica la pesquería monoespecífica con una flota industrial que explota básicamente los reproductores. La sobrexplotación de los reproductores (sobrepesca de reclutamiento) puede conducir al hundimiento de la población, tal y como ha sucedido en muchos lugares con el bacalao. En otras zonas, las pesquerías son multiespecíficas y realizadas por flotas artesanales o semiindustriales que pescan reclutas. La sobrexplotación de los reclutas (sobrepesca de crecimiento), aunque limita el rendimiento pesquero, no provoca *a priori* un agotamiento de la población.

2. Ejemplar de cabrilla (Serranus cabrilla) *en aguas litorales del Mediterráneo. Fotografía de Josep M.ª Gili*

3. Captura monoespecífica de boquerón (Engraulis encrasicolus)*, especie pelágica, es decir, de vida no ligada al fondo, capturada por un barco de cerco en el Mediterráneo occidental. Estos barcos utilizan una ecosonda para localizar los bancos de peces pelágicos durante la noche. Una vez localizados, concentran los peces mediante una atracción luminosa y los encercan con las redes en la misma superficie del mar*





4. Capturas multiespecíficas de especies demersales, es decir, que viven sobre o cerca del fondo (derecha) *obtenidas por un barco de arrastre perteneciente a la flota semiindustrial en el Mediteráneo occidental* (arriba). *Estos barcos arrastran sus redes por el fondo durante el día, donde vive un gran número de especies*



Reguladores del crecimiento vegetal

Los reguladores del crecimiento transmiten a las células los mensajes necesarios para que su desarrollo y diferenciación en tejidos y órganos sean procesos coordinados. ¿Cuáles son los hitos de esa vía transmisora?

Teresa Altabella y Antonio F. Tiburcio

A lo largo de la evolución los organismos han ido adquiriendo la capacidad necesaria para modular su actividad metabólica y asegurarse un desarrollo controlado. Esa capacidad toma cuerpo en determinados mecanismos internos, regulados por hormonas.

La endocrinología animal tiene una larga historia. En los animales, las hormonas cumplen funciones de mensajeros químicos. Se sintetizan en glándulas específicas y viajan desde allí hasta el punto de intervención. Además, la respuesta inducida ante la señal está regulada por la concentración de hormona.

Mucho más reciente es el conocimiento de las hormonas vegetales. En 1928, Friedrich Went, botánico holandés, mientras estudiaba el efecto ejercido por la luz sobre el crecimiento de plántulas de avena, observó que la auxina se comportaba como una hormona genuina: influía en el crecimiento, el efecto ejercido dependía de su concentración y operaba en un lugar diferente del centro de síntesis.

A partir de los años cincuenta, se multiplicaron los descubrimientos de nuevas hormonas vegetales. La investigación en el campo de la patogénesis sacó las giberelinas a la luz; los ensayos de cultivo *in vitro* de tejidos vegetales se encontraron con las citoquininas; los intentos de controlar los procesos de abscisión (caída de las hojas) y dormición de yemas y semillas permitieron conocer el ácido abscísico (ABA), y la observación de los efectos producidos por la iluminación con gas sobre los frutos reveló la acción del etileno. A esa gavilla inicial se sumarían más tarde poliaminas, brasinoesteroides, ácido jasmónico y derivados y ácido salicílico.

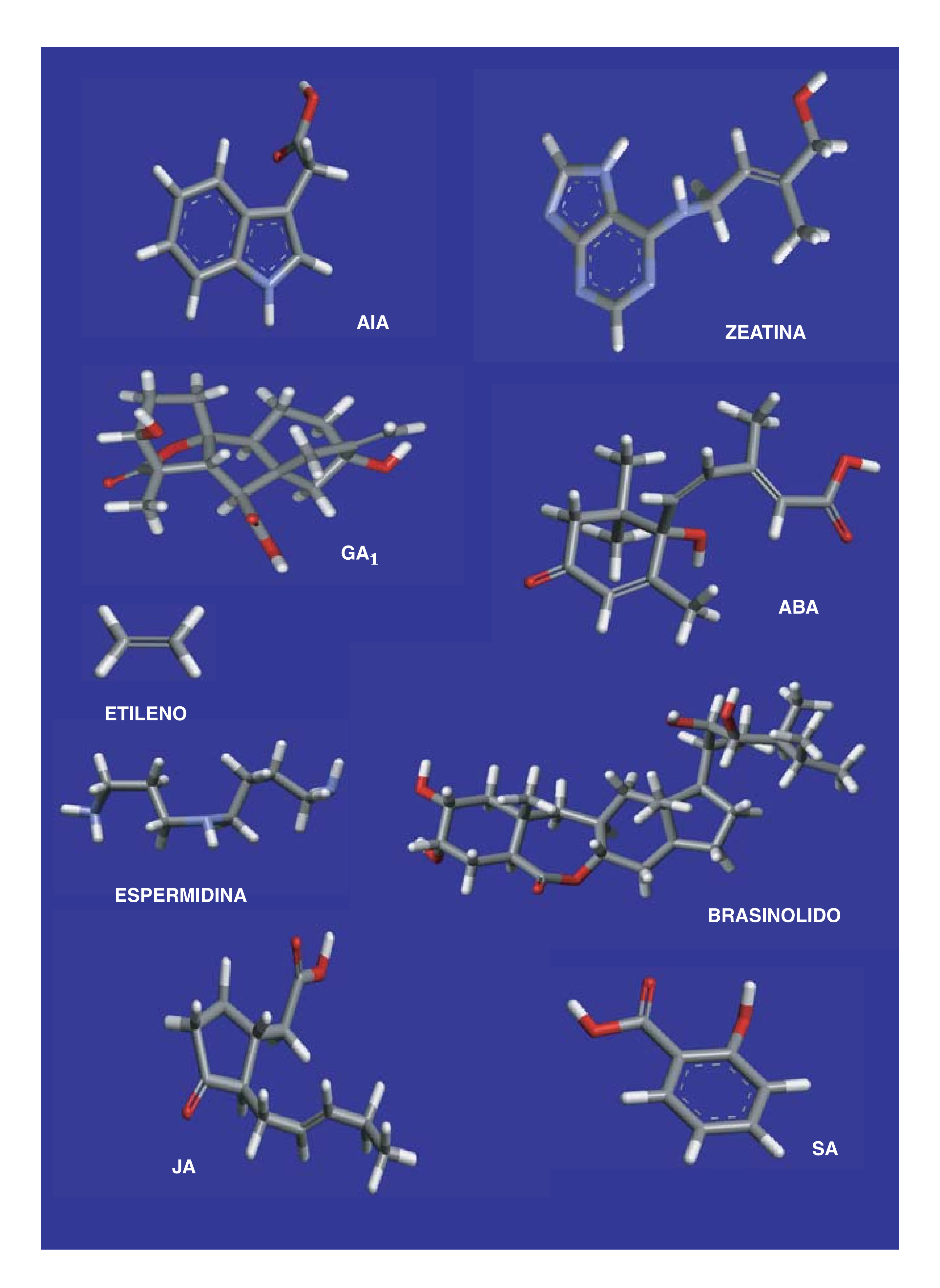
Pero no siempre las hormonas vegetales presentan las características típicas de las animales. La producción de etileno en un tejido origina cambios en el patrón de desarrollo del mismo tejido e incluso de la célula en que se sintetiza. Debe, pues, descartarse el criterio de transporte como propiedad distintiva de una hormona vegetal. Además, los efectos fisiológicos inducidos no dependen sólo de su concentración, sino también de la sensibilidad del tejido a las hormonas. Por esos motivos se tiende hoy a reemplazar la expresión hormona vegetal por la de reguladores del crecimiento vegetal (RCV). La única característica esencial sería la de poseer capacidad de controlar o alterar el desarrollo de la planta.

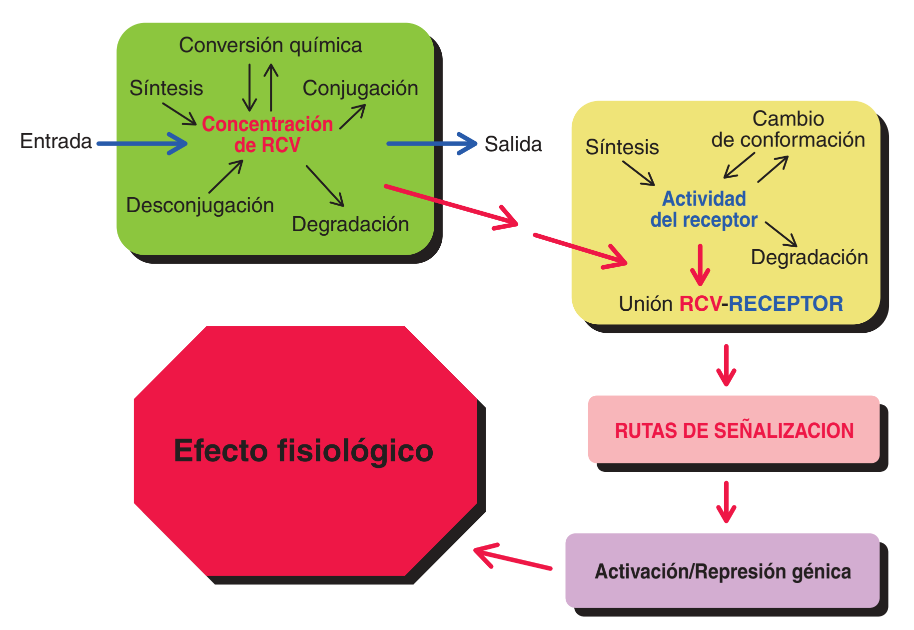
En los organismos pluricelulares la división y crecimiento de las células, su diferenciación y organización en tejidos, así como sus actividades metabólicas, deben producirse de forma armónica. Para ello se requiere la comunicación intercelular. Ahora bien, durante el desarrollo aumenta la complejidad del organismo; la comunicación demanda entonces sistemas de señalización capaces de operar a larga distancia.

Detección de las señales

En los animales corresponde a los receptores de las células efectoras o diana detectar las señales químicas, las hormonas. De naturaleza proteica, los receptores traban a las hormonas de una forma específica y reversible. Pero, a diferencia de lo que ocurre en el acoplamiento de las enzimas con el sustrato, las hormonas no modifican la estructura química de los receptores. Aunque el receptor sí experimenta un cambio de conformación. Constituido en molécula activa, el receptor pone en marcha el programa que conducirá a la respuesta fisiológica.

1. LOS REGULADORES DEL CRECIMIENTO VEGETAL varían en tamaño y estructura. Se agrupan en auxinas, giberelinas, citoquininas, ácido abscísico, etileno, poliaminas, brasinoesteroides, ácido jasmónico y ácido salicílico. Aquí ilustramos la estructura química tridimensional de algunos de los componentes más representativos de tales familias: ácido indolacético, zeatina, giberelina 1, ácido abscísico, etileno, espermidina, brasinólido, ácido jasmónico y ácido salicílico. Hay moléculas lineales y estructuralmente sencillas, como etileno o espermidina, y otras más complejas con núcleos aromáticos y heterociclos (ácido indolacético, zeatina y ácido salicílico) o con estructuras policíclicas (giberelina 1, brasinólido, ácido abscísico).


AIA
ZEATINA
GA1
ABA
ETILENO
ESPERMIDINA
BRASINOLIDO
JA
SA



2. LA ACCION DE LOS REGULADORES DEL CRECIMIENTO depende de su concentración, función a su vez de procesos de biosíntesis. En las células diana, la forma activa del RCV interacciona con un receptor de naturaleza proteica. Al unirse éste con el regulador experimenta un cambio de conformación. Transformado en receptor activado, pone en marcha un programa de señalización constituido por una serie más o menos compleja de elementos (cadena de transducción de señal), que conducen finalmente a una respuesta fisiológica.

¿Cuáles son los componentes de la "ruta de señalización o transducción de señal"? Entenderemos por tal la serie de procesos bioquímicos que transcurren desde la percepción de la señal, molécula activa del regulador del crecimiento, hasta la respuesta final o efecto fisiológico observado.

La acción de los reguladores del crecimiento vegetal depende, en parte, de la concentración de su forma activa. Dicha cuantía se halla, a su vez, sujeta a la biosíntesis, catabolismo y conjugación con otras moléculas —ésteres, glucósidos o amidas— de las que puede liberarse la forma activa por hidrólisis enzimática.

Para conocer en qué procesos fisiológicos intervenía un regulador del crecimiento, se acostumbraba relacionar los cambios registrados en sus niveles endógenos con un determinado proceso del desarrollo. También se optaba por establecer qué procesos se sentían afectados por la aplicación exógena del RCV o sustancias químicas que bloquearan su metabolismo o transporte. Pero tales métodos arrojaban escasa luz, habida cuenta de que la aplicación de cualquier sustancia exógena se halla sujeta a limitaciones en la toma, transporte y metabolismo. Hoy, gracias a la sensibilidad de las técnicas analíticas y al empleo de métodos propios de genética molecular se han dado avances espectaculares en el conocimiento del modo de acción de los reguladores del crecimiento.

Plantas transgénicas

Cuando disponemos de un gen que determina alguna enzima implicada en la síntesis de un RCV o de un precursor limitante, podemos aumentar o rebajar *in vivo* los niveles del regulador del crecimiento vegetal mediante la introducción del gen, en sentido o antisentido, en una planta transgénica.

La notable diversidad de promotores transcripcionales existentes permite dirigir la síntesis del regulador hacia un determinado tejido, controlarla por choque térmico y otros estímulos externos o inducirla sólo en un momento estipulado del desarrollo por compuestos químicos. Así es como podemos manipular los niveles endógenos de RCV de forma precisa y reproducible.

La mayoría de las enzimas comprometidas en la biosíntesis de reguladores del crecimiento aparecen en cantidades mínimas. En muchos casos hay que trabajar con plantas transgénicas que porten genes de bacterias y hongos implicados en el metabolismo de los RCV. Este es el caso de *Agrobacterium tumefaciens*, una bacteria patógena del suelo, que induce en las plantas infectadas tumores, resultado de la sobreproducción de determinados RCV.

La bacteria se comporta como un vector natural. Transfiere al genoma de la célula huésped una porción de su material genético, incluida en un plásmido inductor de tumores (pTi). En el plásmido se encuentran los genes que determinan la síntesis de auxina (*iaaH*, *iaaM*) y la fabricación de citoquininas (*ipt*).

Se ha recurrido a los genes *iaaH*, *iaaM* e *ipt* para estudiar los efectos de auxinas y citoquininas sobre la dominancia apical, es decir, para conocer el control ejercido por el ápice del tallo sobre el crecimiento de yemas laterales. En las plantas de tabaco, la sobreexpresión del gen *iaaM* decuplica la concentración de ácido indolacético libre con respecto a las plantas sin transformar; eso se traduce en una dominancia apical más

3. RESPUESTA INDUCIDA de plantas transgénicas ante el estímulo hormonal de los reguladores del crecimiento. Se han desarrollado varios sistemas que permiten el control transcripcional del transgén introducido en las plantas mediante la aplicación de un agente químico inductor de la expresión. El sistema "TetR-represor" se basa en las propiedades del operón bacteriano que opone resistencia al antibiótico tetraciclina (operón tet) en *E. coli*. La proteína TetR interacciona con las secuencias operadoras presentes en el operón tet y así los genes sólo se expresan en respuesta al agente inductor (tetraciclina). El inductor atrapa a la proteína represora e impide su unión al ADN. Nos hemos servido de ese sistema para sobreexpresar el gen de la proteína ADC de avena en plantas transgénicas de tabaco. En la figura se detalla la estructura de la región del ADN del plásmido que contiene la región codificadora de la ADC de avena, bajo el control del promotor TripleX y el terminador del gen *ocs*. En la misma orientación del sentido de transcripción se encuentra el gen de selección *hyg* que proporciona resistencia al antibiótico higromicina. También se muestran las alteraciones fenotípicas de plantas transgénicas T1 (52,6+Tc) después de tres semanas de inducción comparadas con las plantas control: plantas silvestres tratadas con el agente inductor (TetR+Tc) y plantas transgénicas no tratadas con tetraciclina (52,6-Tc). En el fenotipo se advertía inhibición del crecimiento, clorosis intervenal seguida de necrosis, alteraciones en la expansión foliar en hojas jóvenes e inhibición del crecimiento de la raíz.

TERESA ALTABELLA y ANTONIO FERNANDEZ TIBURCIO enseñan biología vegetal en la Universidad de Barcelona, donde se formaron. Fernández Tiburcio amplió estudios en la Universidad de Yale y en el Instituto Max-Planck de Investigaciones Genéticas de Colonia; Altabella realizó su trabajo de posgrado en la Universidad de California en San Diego. Desde 1994, investigan el control del crecimiento y desarrollo vegetal por poliaminas y otros reguladores.

clara, que revierte por aplicación exógena de citoquininas.

Por su parte, la sobreexpresión del gen *ipt* centuplica los niveles de citoquininas y produce una pérdida de la dominancia apical. Un fenotipo similar se observa en plantas que presentan niveles de auxina activa 20 veces menores de los normales, debido a la sobreexpresión del gen *iaaL* de *Pseudomonas syringe* pv. Savastanoi, que determina la enzima que conjuga AIA con lisina. De ello se desprende que la dominancia apical está regulada por la relación entre auxina y citoquinina; no depende, pues, de los niveles absolutos de estos reguladores del crecimiento.

Pero las alteraciones en los niveles de RCV se dejan sentir en el tamaño y la forma celular de órganos y tejidos. Cierto que no de todos. La sobreproducción de auxinas o citoquininas en embriones de petunia no ejerce ningún efecto perceptible. En nuestro laboratorio de la facultad de farmacia de la Universidad de Barcelona, hemos obtenido plantas transgénicas de tabaco que producen niveles elevados de putrescina (precursora de poliaminas) causados por la sobreexpresión del gen que determina la arginina descarboxilasa, enzima que interviene en la descarboxilación de arginina para formar putrescina. La sobreexpresión del transgén en plantas jóvenes frena el crecimiento y provoca clorosis y necrosis intervenal, así como malformaciones en el meristemo apical. Alteraciones que no se aprecian cuando la tetraciclina, utilizada para inducir la expresión del transgén, se aplica en un estado más avanzado del desarrollo.

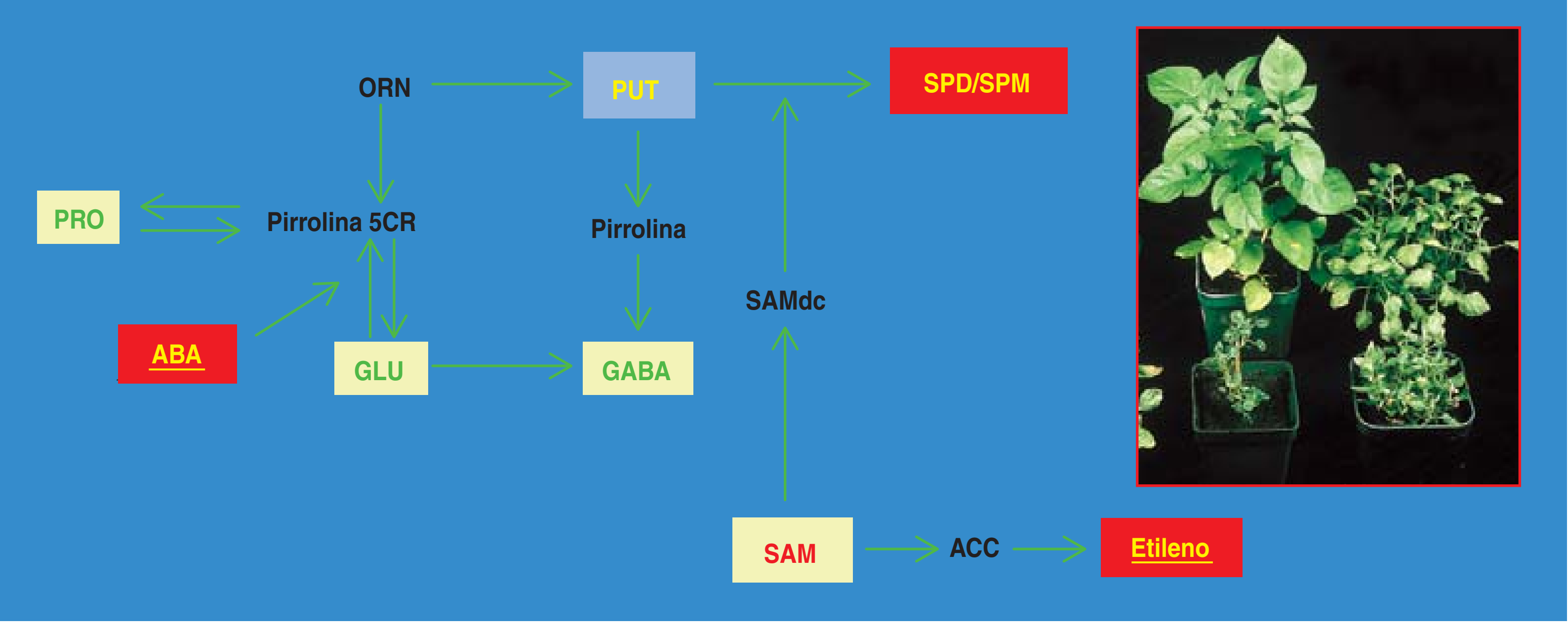
En muchos procesos fisiológicos resulta difícil establecer si el efecto apreciado se debe a un solo regulador del crecimiento o a la interacción entre varios. A modo de botón de muestra: para obtener cultivos *in vitro* de tejidos vegetales se requiere la presencia de auxinas y citoquininas, pero la diferenciación de raíces o yemas aéreas en esos tejidos depende de la proporción de ambos RCV en el medio de cultivo.

Los experimentos con plantas transgénicas demuestran la compleja interacción que existe entre los reguladores del crecimiento. Es tarea imposible pretender acotar sus efectos uno a uno. En las plantas de tabaco que sobreexpresan el gen *iaaM*, además del incremento en la dominancia apical comentado, se produce una reducción de tamaño. Se sabe, además, que el ácido indolacético estimula la acción de la ACC sintasa, enzima de la síntesis de etileno; por tanto, en dichas plantas no sólo suben los niveles de auxina, sino también los de etileno.

¿Cuál de los dos RCV es el responsable del efecto ejercido? Para dilucidar la cuestión se nos ofrecen varias opciones experimentales. Podríamos producir plantas dobles trans-

Adobe Encore DVD 2.0.lnk





4. PARA REPRESENTAR LA INTERACCION entre reguladores podemos fijarnos en la interacción poliaminas/ácido abscísico, o en la interacción poliaminas/etileno En el primer caso, las poliaminas y el ABA son dos reguladores implicados en los procesos de estrés. Podríamos relacionar esa interacción con la conexión metabólica existente entre poliaminas y prolina (PRO). La ornitina (ORN) sirve de sustrato común para la formación de poliaminas y prolina (PRO). La transcripción del gen de la pirrolina-5-carboxilasa sintetasa, enzima catalizadora del paso de glutamato (GLU) a pirrolina-5-carboxilada (pirrolina 5-CR), está regulada por una ruta de señalización dependiente de ABA. Lo que sugiere una vinculación entre el ácido abscísico y el metabolismo de las poliaminas. En el caso de la interacción poliaminas/etileno, las poliaminas y el etileno ejercen efectos antagónicos, ya que el etileno favorece los procesos de senescencia y envejecimiento, mientras que las poliaminas retrasan el envejecimiento. La S-adenosil-metionina (SAM) sirve de sustrato común para la formación de espermidina (SPD) y espermina (SPM), y para la síntesis de ácido 1-amino-ciclopropano carboxílico (ACC), un precursor de etileno. En la parte derecha de la figura se ilustra el fenotipo de plantas transgénicas de patata que sobreexpresan el gen de la SAM descarboxilasa. Las plantas transgénicas muestran un fenotipo con inhibición del crecimiento y adelanto de la senescencia. El fenotipo más acusado corresponde a las plantas que presentan niveles menores de SPD y SPM y mayores de etileno. (Fotografía cedida por A. Kumar y reproducida de *The Plant Journal* vol. 9, págs. 147-158, 1996.)

génicas que expresaran el transgén responsable de la sobreproducción de auxina y otro gen que bloqueara la síntesis de etileno. Podríamos también transformar con el gen *iaaM* mutantes insensibles para el etileno. En ambos casos, el efecto resultaría de la sobreproducción de auxina. Cabría, en un tercer tipo experimental, cruzar plantas portadoras de niveles bajos de auxina activa —que sobreexpresaran *iaaL*— con otras que tengan niveles elevados de etileno por sobreexpresar ACC sintasa o ACC oxidasa. Los fenotipos mostrados se deberían al etileno.

La interacción entre RCV se observa también en plantas transgénicas de patata que sobreexpresan el gen que determina la enzima S-adenosilmetionina-descarboxilasa (SAMDC). Las plantas transgénicas presentaban diferentes patrones de crecimiento *in vitro*, según se acumulase o no etileno en el recipiente de cultivo. Se atribuye el fenotipo de las plantas transgénicas al efecto combinado de la reducción en los niveles de poliaminas y del aumento de la concentración de etileno.

Para entender el mecanismo de acción de los reguladores del crecimiento precisamos identificar los componentes de la cadena de transducción de señal. En primer lugar, el receptor hormonal. Conocemos ya proteínas que se traban de forma específica con determinados reguladores. Pero no todas las proteínas que se unen a los RCV son receptores. Para considerarlas tales, deben inducir al menos una respuesta biológica derivada de dicha unión.

¿Cómo caracterizar a un receptor de RCV? En las vainas del embrión de maíz (coleoptilos) se ha identificado la ABP1, una proteína que se une a auxina. ¿Podría funcionar la proteína ABP1 como un receptor en el proceso de extensión celular inducido por auxina? Para comprobarlo, el equipo de A. M. Jones, de la Universidad de Carolina del Norte, introdujeron el ADN complementario y correspondiente a ABP1 de *Arabidopsis* en plantas de tabaco bajo el control de un promotor inducible por tetraciclina. Observaron que, cuando se inducía la expresión de ABP1, aumentaba la expansión celular mediada por auxina.

Asimismo, transformaron una línea celular de endospermo de maíz —carente de ABP1— con una construcción portadora del ADNc correspondiente a la ABP1 del maíz. Comprobaron que la aplicación de auxina a la línea celular control no afectaba al tamaño de las células, mientras que en la línea celular transformada con ABP1 aparecía un incremento del tamaño celular dependiente de auxina. Estos resultados, sumados a los obtenidos sobre la capacidad de unión de ABP1 a auxina, respaldaban la hipótesis de que dicha proteína fuera un receptor de auxina, implicado en el control de la expansión celular.

El enfoque genético

A ese conjunto de estrategias para identificar posibles receptores de RCV hemos de añadir la aproximación "genética". Consiste en la búsqueda de mutantes cuya respuesta ante el estímulo del regulador estudiado se halle alterada, bien porque no responda en absoluto o bien porque lo haga incluso en ausencia del

RCV. Mediante clonación del gen mutado podemos conocer la proteína cuya modificación produce el nuevo fenotipo. Ese cambio podría operar en la recepción, en la vía de transducción de señal del RCV o en ambas. Ha sido el método seguido con éxito para aislar y caracterizar el receptor de etileno (ETR1).

La búsqueda de mutantes de *Arabidopsis* que presentan alteraciones en la triple respuesta al etileno —inhibición del crecimiento del hipocotilo y de la raíz, engrosamiento del hipocotilo y resalte de la curvatura apical— ha permitido identificar dos genes clave (*etr1* y *ctr1*) de la ruta de transducción de señal de dicho regulador del crecimiento. Se descubrió el gen e*tr1* a partir de un mutante resistente al etileno. Ese gen determina una proteína similar a la histidina quinasa, que forma parte de un sistema de dos componentes comprometido en la percepción de señales ambientales de levaduras y bacterias.

El sistema de dos componentes consta de una histidina quinasa, unida a la membrana plasmática, y de una proteína reguladora, activada por la transferencia de grupos fosfato. En el receptor de etileno ambos componentes se asocian en una sola proteína. El equipo de Bleecker, de la Universidad de Wisconsin en Madison, halló que las mutaciones operadas en el gen *etr1* de *Arabidopsis thaliana* conferían resistencia al etileno. Ello indicaba que el producto del gen intervenía en la vía de transducción de señal del regulador. Comprobaron luego que, cuando la proteína receptora ETR1 se expresaba en levadura, el microorganismo adquiría la capacidad de fijar el etileno; dicho de otro modo, ETR1 actuaba como un receptor de etileno.

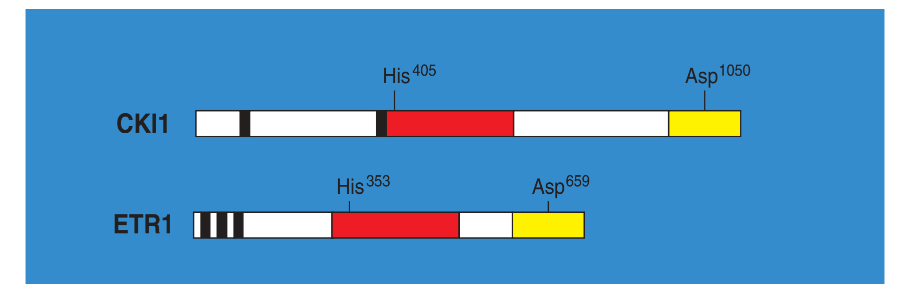
El segundo gen implicado en la respuesta a etileno, *ctr1*, se identificó a partir de un mutante de respuesta constitutiva, e interviene en la ruta de transducción de señal más tarde que el gen *etr1*. La proteína CTR1, cifrada por dicho gen, es un "regulador negativo" de la ruta de transducción de señal del etileno; en condiciones normales, inhibe la cascada de señales que va desde la percepción del RCV hasta el efecto fisiológico.

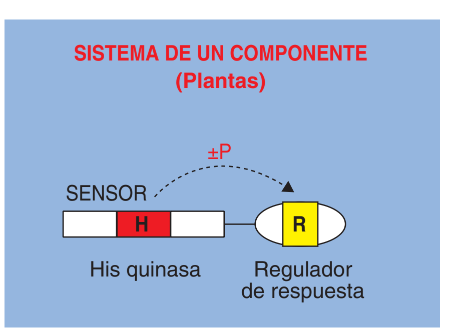
Ocurre, en efecto, que el extremo carboxilo terminal de CTR1 resulta ser homólogo con las serina-treonina quinasas de tipo *raf*. Se trata de enzimas involucradas en las rutas de transducción de señales en animales y activadas por translocación en la membrana plasmática, mediada por una proteína ras. Puesto que las proteínas ras aparecen también en los vegetales, se supone que habrá otras proteínas transportadoras o que la molécula CTR1 se encuentre ya en la membrana y sólo necesite ser activada. Si consideramos que, en los animales, las proteínas raf y, en la levadura, el sistema de dos componentes se hallan conectados con una cascada de MAP quinasas, nada tendría de extraño que tales proteínas participaran en la respuesta de las plantas al estímulo hormonal del etileno.

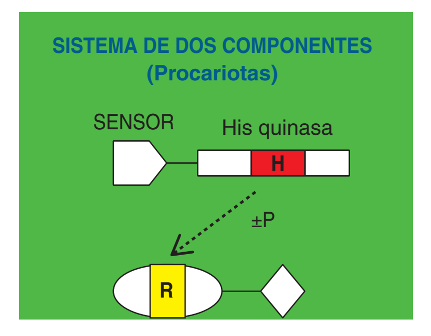
Se sabe ya de una proteína similar a ETR1 implicada en la respuesta a las citoquininas. Kakimoto, de la Universidad de Osaka, obtuvo mutantes insertando ADN en callos procedentes de hipocotilos de *Arabidopsis thaliana*. En este sistema de respuesta no se trataba de inhibir, sino de activar la expresión del gen afectado por la mutación. De ahí que los callos mutantes se seleccionaran en razón de su capacidad para crecer en un medio sin citoquinina. Tras identificar y clonar el gen afectado, *CKI1*, se observó que los callos transformados con el mismo presentaban un patrón de desarrollo independiente de citoquininas. La secuencia de aminoácidos de la proteína CKI1 reveló la existencia de regiones de homología con los sistemas de dos componentes implicados en la percepción y transducción de señales ambientales en bacterias y levaduras y, consecuentemente, con ETR1. En consonancia, pues, la molécula CKI1 podría ser un receptor de citoquininas.

Elementos *cis* y factores *trans*

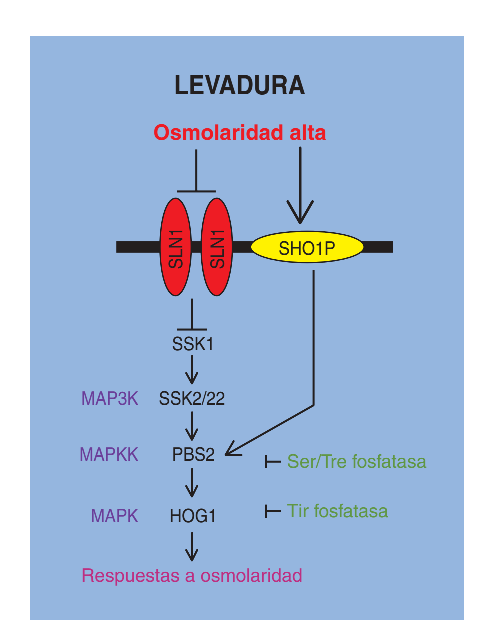
Los reguladores del crecimiento gobiernan la transcripción de determinados genes y, por ende, los niveles de sus ARNm y proteínas. El análisis molecular de tales genes nos lleva a los elementos responsables de la respuesta al RCV situados en el promotor del gen afectado (elementos *cis*) y a las proteínas nucleares con las que interaccionan estos elementos (factores *trans*). Las interacciones entre elementos y factores determinan los cambios de expresión

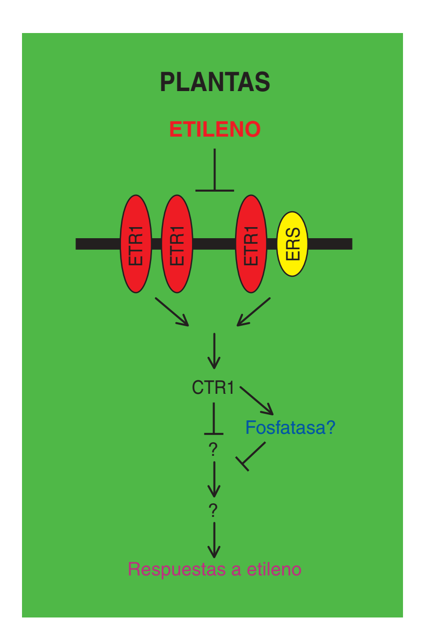






5. RECEPTORES DE REGULADORES DEL CRECIMIENTO. El receptor de etileno (ETR1) y el posible receptor de citoquininas (CKII) agrupan en una misma proteína (sistema de un componente) dos elementos similares al sensor y regulador. Se encuentran en el sensor las secuencias hidrofóbicas (*negro*), que constituyen un dominio transmembrana, donde reside el lugar de unión a etileno, y los dominios histidina quinasa (*rojo*) con los lugares putativos de fosforilación en las histidinas (His) de las posiciones 405 (ETR1) y 659 (CKII). En el regulador de respuesta (*amarillo*) se incluyen los lugares de fosforilación de los ácidos aspárticos (Asp) de las posiciones 1050 (ETR1) y 659 (CKII). La histidina del sensor se fosforila utilizando ATP como donador de fosfato. Este ion se transfiere luego desde los dominios de histidina a los residuos de aspartato de los reguladores respectivos, localizados en la misma proteína (un componente) o en otra proteína distinta (dos componentes).





6. SI COMPARAMOS LA RUTA DE SEÑALIZACION de la levadura (*izquierda*) con la de las plantas (*derecha*) se aprecian notables diferencias. En las levaduras, el sensor (un dímero SLN1*)* funciona como un sistema de dos componentes que actúa fosforilando a SSK1, que a su vez activa la cascada de las MAP quinasas, dando como resultado las respuestas a los cambios de osmolaridad. Una ruta de señalización alternativa está representada por el control directo que ejerce la proteína de membrana SHO1P sobre PBS2. Las actividad de las MAP quinasas está regulada negativamente por fosfatasas. En las plantas se ha comprobado que el etileno regula negativamente la actividad de ETR1. El sensor, en forma de homodímero ETR1 o de heterodímero con ERS (histidina quinasa homóloga a ETR1), actuaría como un sistema de un componente que controla la actividad de CTR1. El regulador CTR1 podría ejercer un control negativo sobre el resto de la ruta de señalización del etileno.

génica producidos durante el desarrollo de la planta.

Los genes cuya expresión está controlada por reguladores del crecimiento vegetal pueden dividirse en dos grandes grupos: genes independientes y genes dependientes. En los primeros se encuadran aquellos cuya expresión es independiente de la síntesis proteica y no requieren, pues, la expresión de otros genes para inducir la respuesta al RCV (genes de respuesta primaria). En los segundos, los genes inducidos por RCV cuya expresión depende de la de otros genes. En muchos casos, los cambios en los niveles de ARNm inducidos por un regulador del crecimiento sólo se detectan mediante la técnica de hibridación “Northern”, que no revela en qué nivel se despliega el control de la expresión génica. Por ello es necesario determinar los niveles de ARNm específicos en núcleos transcripcionalmente activos. De las diferencias entre los datos obtenidos con uno y otro análisis se infiere una regulación postraduccional, que puede afectar a la maduración del ARNm, a su transporte o a su estabilidad en el citoplasma.

Jacobsen y Chandler, del CSIRO australiano, observaron que la síntesis de α-amilasa inducida por GA3, durante la germinación de semillas de cereales, se debía a una activación transcripcional, es decir, a una síntesis *de novo* de ARNm. Descubrieron, además, que cuando los genes quiméricos portadores del promotor del gen de la α-amilasa de trigo o cebada fusionado al gen delator GUS (β-glucuronidasa) se introducían en protoplastos o capas de aleurona intactas de cebada o trigo se comprobaba que la expresión de los genes testigo estaba regulada por GA3 y ácido abscísico; control que dependía de la dosis. Ese resultado respaldaba la presencia de elementos de respuesta a la hormona (HRE) en el promotor del gen.

El estudio de los promotores de los genes de α-amilasa ha permitido identificar tres secuencias cortas necesarias para obtener una respuesta completa del gen ante el estímulo de la hormona vegetal giberelina 3, que forman el complejo GARC. Los factores *trans* que interaccionan con estos elementos *cis* pueden ser proteínas preexistentes, que se activan por acción de la giberelina, o sintetizadas *de novo*. El tratamiento con cicloheximida, un inhibidor de la síntesis proteica, indica que en este caso se requiere síntesis proteica *de novo*.

Del análisis del GARC se llegó a dos posibles lugares de unión a MYB (factores de transcripción que regulan el crecimiento y desarrollo en animales). A partir de una librería de ADN complementario de aleurona de cebada, se aisló un nuevo gen *myb* (*GAmyb*) cuya expresión se activa por el regulador giberelina y no se bloquea por cicloheximida. Se trata de un gen de respuesta primaria ante el estímulo de la giberelina. *In vitro*, la proteína producto de este gen se une específicamente a la caja TAACAAA del GARC y, en experimentos de expresión transitoria, activa la transcripción de un gen quimérico obtenido por fusión del promotor de α-amilasa con el gen testigo GUS. Estos resultados indican que el gen *GAMyb* es un factor de transcripción regulado por giberelina, que se requiere para la activación del promotor del gen de la α-amilasa. Por tanto, se le considera parte de la ruta de señalización del regulador giberelina que conduce a la expresión de dicho gen en células de aleurona.

La inducción del gen *RD22* de *Arabidopsis* por un regulador del crecimiento (en este caso el ácido abscísico) requiere también la síntesis *de novo* de proteínas. Hay en el promotor de este gen una región de 67 pares de bases esencial para la inducción, que contiene varios dominios característicos de unión a proteínas, tales como MYC y MYB. El equipo de Yamaguchi-Shinozaki, de la Universidad de Tsukuba, tras clonar los genes homólogos de *MYC* y *MYB* en *Arabidopsis*, descubrió que las proteínas cifradas por aquéllos interaccionaban con la región de 67 pares de bases identificada en el promotor. La expresión de estos dos genes viene promovida por la deshidratación, alta concentración de sal y tratamiento con ácido abscísico. Si tenemos en cuenta que la expresión de los genes *myb* está regulada por giberelinas y ácido abscísico, nos veremos obligados a suponer que la acción antagónica de ambos RCV esté mediada por estos genes.

El gen *Em* forma parte de un grupo de genes que se expresan exclusivamente en embriones en maduración en respuesta a niveles elevados del regulador ácido abscísico. A diferencia del gen *RD22*, el gen *Em* es de respuesta primaria y su ex-

presión requiere la presencia de la caja-G y de un complejo regulador en el promotor, así como de factores de transcripción preexistentes del tipo de cremallera de leucinas. Se sabe que la aplicación exógena de la hormona vegetal mencionada inhibe la germinación de las semillas y se han caracterizado mutantes vivíparos *(vp1)*, cuyas semillas germinan precozmente en los frutos por una deficiencia en la síntesis de ABA o en la respuesta a este RCV.

En las plantas de maíz y arroz la expresión del gen *Em* inducida por ácido abscísico requiere la presencia del locus regulador *VP1*. La proteína VP1 tiene diferentes dominios que gobiernan, de forma separada, los procesos de maduración del embrión (regulación del gen *Em*) y la inhibición de la germinación (por ejemplo, inhibición del gen que determina α-amilasa). El grupo de Quatrano, de la Universidad de Washington, ha demostrado que la proteína VP1 interacciona inespecíficamente con diferentes elementos del promotor y facilita la unión de diversos factores específicos de secuencia. Este grupo ha utilizado el sistema del doble-híbrido en levadura para identificar las proteínas que interaccionen con VP1 en el promotor del gen *Em*.

Especificidad celular

Otro aspecto a considerar de los reguladores del crecimiento vegetal es la especificidad celular de su acción. Una vez conocidas las secuencias de ADN implicadas en la respuesta a un determinado regulador, podemos construir genes quiméricos, mediante la fusión del promotor que contiene dichas secuencias con un gen delator/testigo (*gus*, *cat*, *luc*, etc.), para así localizar la actividad génica en tejidos o células. Muchas de las técnicas utilizadas para medir el grado de expresión génica exigen la determinación de actividades enzimáticas en diferentes tejidos, células u orgánulos celulares.

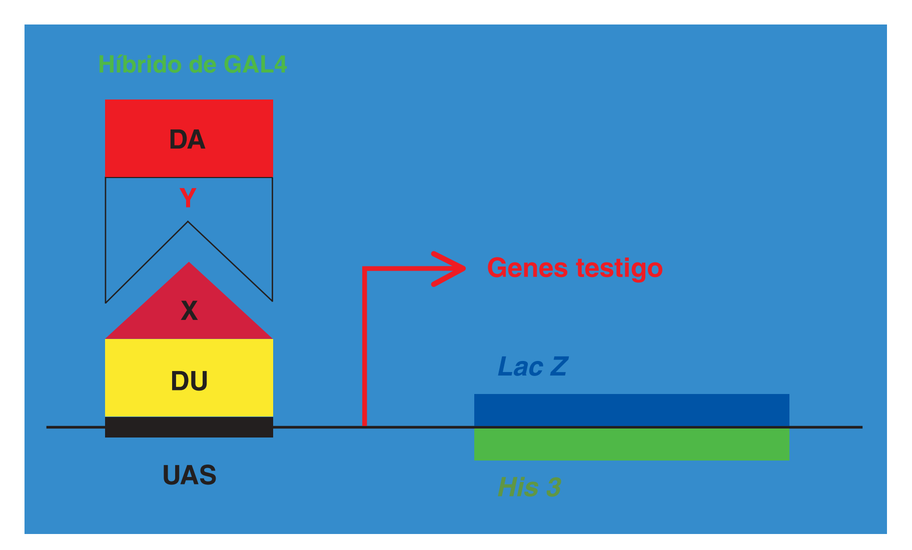
Hace unos 30 años, a partir de invertebrados marinos, se obtuvo la proteína GFP, que emite fluorescencia verde. Luego, se clonó el ADN que la cifraba en *Aequorea*. El gen en cuestión, *gfp10*, produce una proteína fluorescente en una amplia variedad de tipos celulares. La fusión de la proteína con genes específicos permite analizar los cambios de expresión de los mismos mediante la simple determinación de la presencia o ausencia de fluorescencia en las células, tejidos o plantas analizados. El grupo de M. Pagés, del Centro de Investigación y Desarrollo de Barcelona, ha recurrido a ese procedimiento para estudiar diferentes aspectos de la regulación de la expresión de genes de respuesta ante el estímulo hormonal del ácido abscísico.

Respuesta frente a patógenos

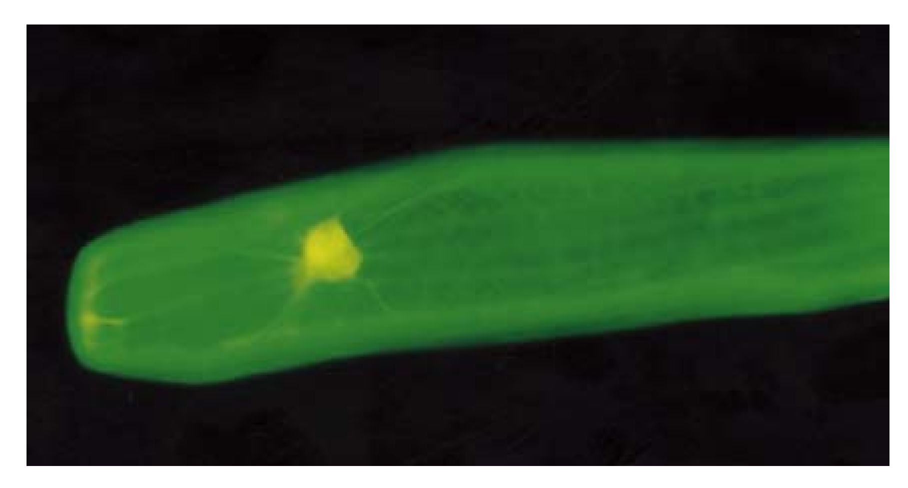
A diferencia de los animales, las plantas superiores permanecen estáticas. Deben, pues, desarrollar mecanismos de adaptación a los cambios ambientales y a los diferentes tipos de estrés a que están sometidas. Lo que redunda a menudo en modificaciones en los patrones de crecimiento, controlados por los distintos reguladores. Las lesiones producidas mecánicamente o por herbívoros rasgan las capas protectoras y abren puertas de entrada para los patógenos. Ante la agresión, la respuesta de defensa consiste en la expresión de un grupo de proteínas reparadoras de la herida. En la mayoría de los casos se trata de una activación transcripcional de los genes correspondientes; unos se expresan en las zonas próximas al lugar lesionado, mientras que otros se activan sistémicamente en zonas incólumes de la planta. La respuesta sistémica en hojas enteras incluye la acumulación de proteínas vegetativas de reserva (VSP) e inhibidores de proteasas.

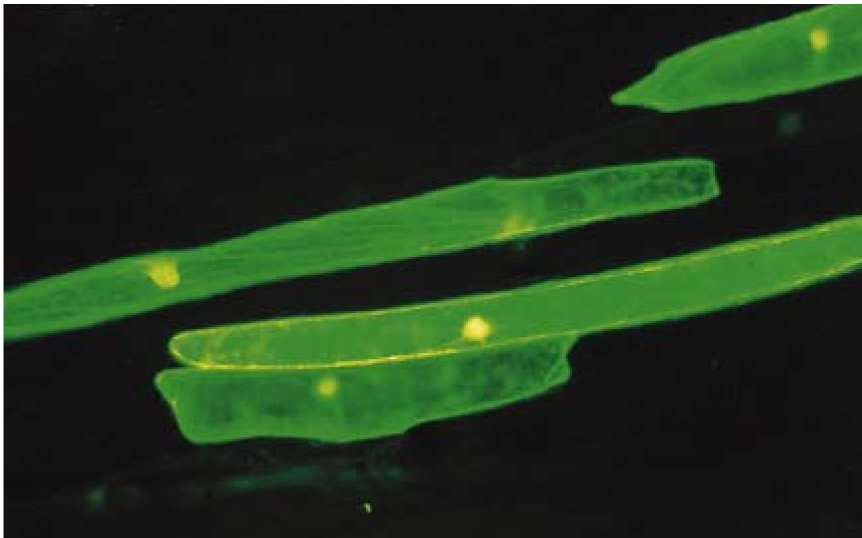
Existen varias sustancias que pueden modular la actividad de los genes inducidos por heridas. Se consideran posibles "señales moleculares" el ácido abscísico, el ácido jasmónico y el ácido salicílico. Se ha detectado, en efecto, un aumento de ABA tras producirse una herida, lo mismo en el tejido afectado que en el intacto. En la patata y el tomate, ese aumento se asocia a la expresión del gen *Pin2*, que determina un inhibidor de proteasas, y a la actividad enzimática de un gen marcador, introducido en plantas transgénicas bajo el control del promotor Pin2. Puesto que el ARNm del gen *Pin2* se acumula en plantas de patata rociadas con ácido abscísico aunque no presenten heridas, se deduce que el incremento de los niveles de ABA es el responsable de la expresión de *Pin2*.

El ácido jasmónico y sus derivados abundan en el reino vegetal. Al tratar con ácido jasmónico la planta, responde ésta de forma muy parecida a lo descrito en el caso anterior del ácido abscísico Por ejemplo, las mismas proteínas inducidas por ABA se detectan en hojas de avena



7. SISTEMA DEL DOBLE HIBRIDO. Se trata de un sistema de detección de interacciones proteína-proteína, fundado en las propiedades de la proteína GAL4 de *Saccharomyces cerevisiae*. Dicha proteína se requiere para la expresión de genes que cifran las enzimas involucradas en la absorción de la galactosa. La proteína GAL4 nativa contiene dos dominios funcionales: el dominio N-terminal de unión a ADN (dominio DU), que se une a secuencias de ADN específicas (UAS), y el dominio C-terminal, que se requiere para la activación transcripcional (dominio DA). El sistema del doble híbrido consiste en generar proteínas híbridas que contengan partes del GAL4: el DU del GAL4 fusionado a una proteína X y el DA del GAL4 fusionado a una proteína Y. Cuando existe interacción entre X e Y se reconstituye la activación de GAL4, que se pone de manifiesto a partir de la expresión de genes testigo (*lac Z* e *HIS3*). Mediante dicho sistema se han identificado numerosas proteínas de las rutas de señalización de RCV.





8. PATRON DE EXPRESION de un gen de respuesta al ácido abscísico (ABA) en células de epidermis de cebolla transformadas mediante un cañón de partículas con un gen quimérico (gen de respuesta a ABA fusionado con el gen testigo). Al irradiar los tejidos con luz azul se puede apreciar la fluorescencia de las células transformadas. (Fotografías cedidas por M. Pagés y A. Borrell.)

tratadas con ácido jasmónico. Este y su éster metílico (MeJA) son componentes importantes en la ruta de señalización que regula la respuesta de la planta ante una agresión. El ácido jasmónico promueve la expresión de *Pin2* y la de otros genes inducidos por herida que respondían a la presencia de ABA. El tratamiento con ácido jasmónico de hojas de patata control y mutantes deficientes en ácido abscísico origina la acumulación de ARNm de *Pin2* en niveles similares, lo que sugiere que el ácido jasmónico se encuentra por debajo del ácido abscísico en la ruta de señalización que conecta la producción de una herida y la acumulación de la proteína Pin2.

Por fin, el ácido salicílico interviene en las reacciones de defensa frente a las infecciones. Los experimentos pertinentes se han realizado en plantas transgénicas de tabaco y *Arabidopsis* que expresaban el gen *nahG*. Este determina la salicilato hidroxilasa de *Pseudomonas putida*, enzima digestiva del ácido salicílico. Las plantas contenían niveles bajísimos de ácido salicílico y, por tanto, de expresión de los genes que determinan las proteínas asociadas a la patogénesis. Dicho de otro modo, no se detectaba resistencia sistémica al patógeno.

Aplicaciones agrícolas

Desde hace tiempo se vienen utilizando en agricultura los reguladores del crecimiento. Antes incluso de ser identificados como tales. A comienzos del siglo XX se prendía fuego junto a los campos para sincronizar la floración del mango y la piña. Se recurría a termogeneradores para estimular la maduración y evitar el color verde de los limones, tras su recolección. Más tarde se comprendió que no era el calor, sino el etileno resultante de la combustión incompleta el agente estimulador de la floración y la maduración. Los reguladores se emplean ahora en millones de hectáreas de cultivos para multiplicar su rendimiento.

Sin embargo, la aplicación exógena de estos compuestos químicos puede tener repercusiones ambientales poco deseables. Además, es difícil obtener los efectos deseados ya que éstos dependen de la dosis de sustancia aplicada, la cual puede verse afectada por las condiciones del entorno. El conocimiento de las enzimas implicadas en el metabolismo de los RCV y de los genes que los determinan, permite manipular sus niveles endógenos en plantas y evita los problemas de la aplicación exógena. Un ejemplo son los tomates transgénicos, ya comercializados, con maduración retrasada por expresión de los genes, que determinan enzimas de la biosíntesis de etileno en orientación antisentido.

Todavía queda mucho por conocer sobre el metabolismo de los reguladores del crecimiento, así como la identidad y funciones de elementos implicados en las rutas de señalización. Sin embargo, los avances realizados durante los últimos años dan pie a esperar que se caractericen muy pronto todos los componentes que participan en los procesos del desarrollo controlados por RCV. Esto dará lugar a la obtención de cultivos más rentables.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

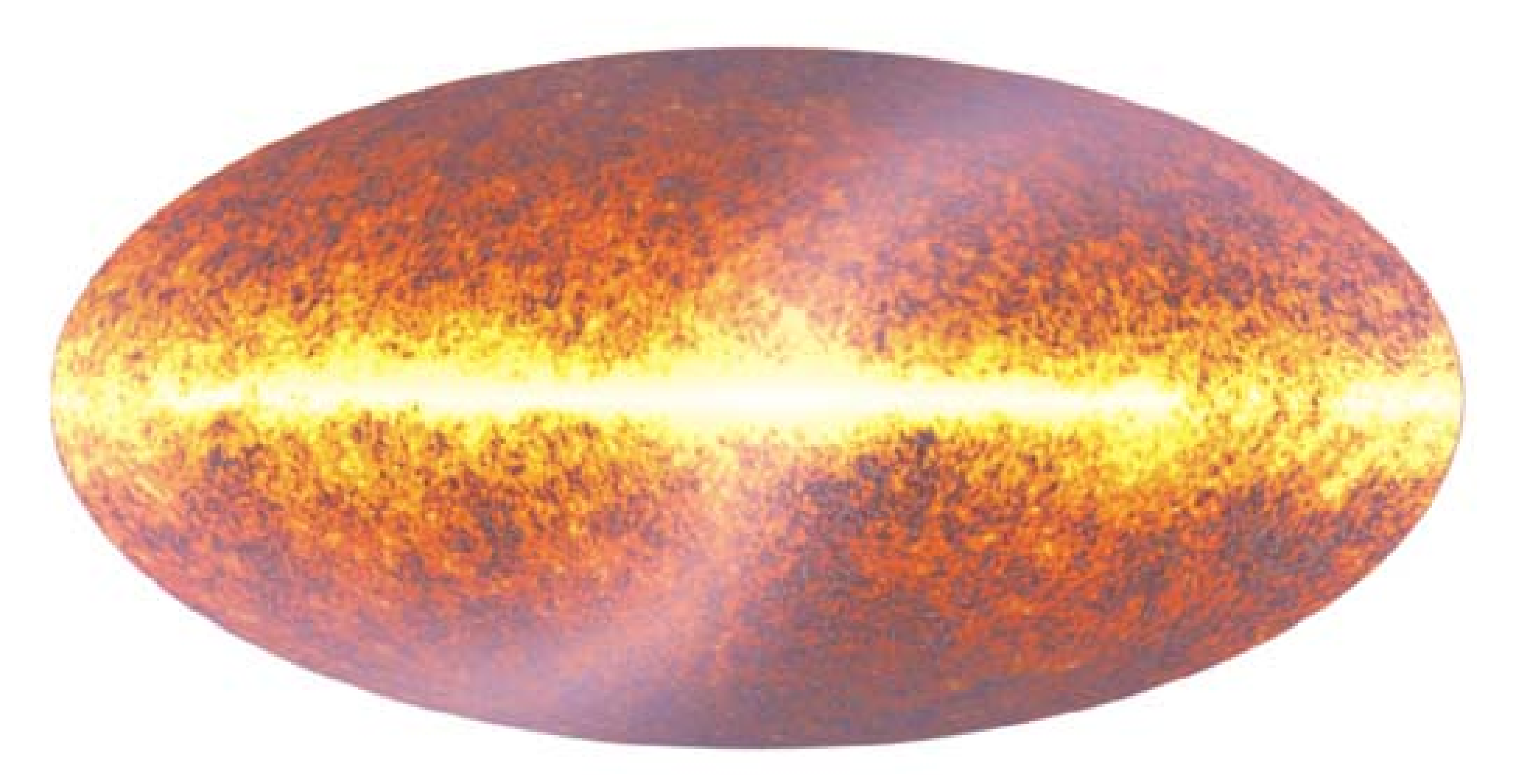
SIGNALS AND SIGNAL TRANSDUCTION PATHWAYS IN PLANTS. Dirigido por Klaus Palme. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1994.

PLANT HORMONES. PHYSIOLOGY, BIOCHEMISTRY AND MOLECULAR BIOLOGY. Dirigido por P. J. Davies. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1995.

HORMONES, REGULATING AND SIGNALLING SUBSTANCES IN PLANT GROWTH AND DEVELOPMENT. Dirigido por C. Bornman, en *Physiologia Plantarum*, vol. 100, págs. 497-738, 1997.

BIOCHEMISTRY AND MOLECULAR BIOLOGY OF PLANTS. B. B. Buchman, W. Gruissem y R. L. Jones. American Society of Plant Physiologist. 2000.

El cosmos extraño



VENTANA ABIERTA AL PASADO
La *Sonda de la anisotropía del fondo de microondas* proporcionará un mapa, que cubrirá todo el cielo, de la radiación del fondo cósmico de microondas que se emitió hace casi 15.000 millones de años.

La cosmología atraviesa una crisis de principios. Nuevos descubrimientos han puesto en entredicho teorías acerca de la evolución del universo en las que se creía desde hacía mucho. Pero bajo tamaña conmoción hay una esperanza firme: que la *Sonda de la anisotropía del fondo de microondas*, o *MAP*, aporte las respuestas a algunas de las preguntas más acuciantes. Con precisión inaudita, tomará imágenes del material que llenaba el universo primitivo, cuando las estrellas y las galaxias no eran más que un sueño de la naturaleza. Esas imágenes llevarán cifradas las estadísticas vitales del universo: forma, contenido, orígenes y destino. Desde el *Telescopio Espacial Hubble* no se habían puesto tantas esperanzas en un observatorio espacial.

Gracias a instrumentos como ésos la cosmología ha dejado de ser una ciencia teórica y se ha vuelto observacional, cuantitativa. La mejora de la precisión de las observaciones desencadenó la revolución cosmológica de hace tres años, cuando los observadores de las supernovas llegaron a la conclusión de que la expansión cósmica se acelera, idea que en otro tiempo movía a la irrisión.

De la madurez de la cosmología observacional tratan los dos primeros artículos de esta sección especial. Robert Caldwell y Marc Kamionkowski hablan de cómo podrían el *MAP* y sus sucesores consolidar la teoría de la inflación, que cuenta con mucha aceptación pero no está bien corroborada. A continuación, tres miembros del equipo científico del *MAP* —Charles Bennett, Gary Hinshaw y Lyman Page— dan una idea de los entresijos de su artilugio, que deberá cribar una señal insignificante en un océano de ruidos confusos.

El tercer artículo cuenta que la revolución está entrando en una nueva etapa. Ahora que los cosmólogos han aportado buenas razones para creer en la aceleración cósmica, los teóricos deben explicarla. La hipótesis usual —la constante cosmológica de Einstein— está plagada de paradojas; por eso, los astrofísicos Jeremiah Ostriker y Paul Steinhardt han pensado en un extraño tipo de energía, la quintaesencia la llaman. A su favor tiene que concilia aceleración cósmica y vida. Las dos parecen antitéticas: impulsada por la inflexible fuerza de la constante cosmológica, la aceleración equivaldría a escala cósmica a una guerra nuclear, una catástrofe de la que no saldría vivo nadie. Pero la quintaesencia deja abierta la posibilidad de un final más feliz.

Por último, John Peebles, el padre de la cosmología moderna, pone en orden las piezas y João Magueijo, uno de los pensadores más originales de la especialidad, medita sobre otras teorías posibles.

—George Musser y Mark Alpert, de la redacción



1. UNIVERSO LISO

En un universo sin variaciones de densidad ni ondas gravitatorias, el fondo cósmico de microondas sería uniforme.

Ecos de la Gran Explosión

Estamos muy cerca de vislumbrar los comienzos del universo. ¿Dónde? En la débil marejadilla de las ondas gravitatorias

Robert R. Caldwell y Marc Kamionkowski

Los cosmólogos siguen planteándose las mismas preguntas que los primeros que levantaron la vista a las estrellas y escrutaron el firmamento. ¿De dónde vino el universo? ¿Qué hubo antes, si es que hubo algo? ¿Cómo llegó el universo a su estado presente? ¿Qué futuro le aguarda? Mucho tiempo llevan los teóricos construyendo conjeturas acerca del origen del cosmos, pero sólo en los últimos años han dado con una forma de sondear los instantes iniciales, que les ha de permitir someter a contrastación sus hipótesis. Se han percatado de que pueden observar cómo era el universo en las primerísimas fracciones de segundo tras la gran explosión. ¿Dónde? En las trazas dejadas por las ondas gravitatorias en la radiación enfriada, el fondo cósmico de microondas (FCM), que impregna el cosmos desde hace casi 15.000 millones de años.

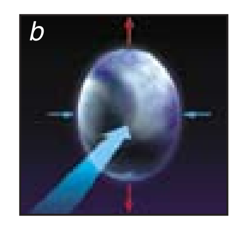
La radiación del FCM se emitió unos 500.000 años después de la gran explosión inicial, cuando los electrones y protones del plasma primordial —la sopa densa y caliente de partículas subatómicas que llenaba el universo primitivo— se combinaron y formaron átomos de hidrógeno. Esa radiación proporciona, pues, una instantánea del universo de entonces. Gracias a ello se ha convertido en la piedra Rosetta de la cosmología. Tras el descubrimiento de la radiación del fondo cósmico de microondas en 1965, se vio que su temperatura —una medida de la intensidad de la radiación del cuerpo negro— estaba muy cerca de 2,7 kelvin, fuera cual fuera la dirección en que se mirase en el cielo. En otras palabras, el FCM parecía ser isótropo y, por tanto, notable la uniformidad del universo. Pero, a principios de los años noventa, el satélite *Explorador del fondo de microondas* (COBE) detectó variaciones minúsculas —sólo una parte en 10.000— de la temperatura de la radiación. Esas variaciones evidenciaban que en el plasma primordial hubo pequeños grumos, inhomogeneidades de la distribución de masa que evolucionaron después hasta convertirse en las macroestructuras del cosmos: las galaxias y los cúmulos de galaxias que existen hoy.

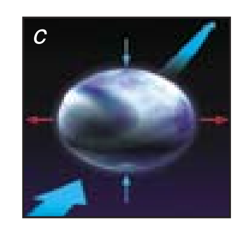
Varios detectores, instalados en tierra o en globos, observaron a finales de los años noventa el FCM con una resolución angular mucho más fina que la del COBE y descubrieron estructuras del plasma primordial que cubren menos de un grado del cielo. (Por mor de comparación, la Luna cubre alrededor de medio grado.) El tamaño de las estructuras primordiales indica que el universo es plano [*véase* “Informe especial: Revolución en la cosmología”, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1999]. Las observaciones concuerdan, además, con la teoría de la inflación, que se basa en la premisa según la cual, muy poco después de la gran explosión, hubo un tiempo de expansión cósmica fabulosamente rápida. Con la *Sonda de la anisotropía del fondo de microondas* (MAP) se extienden las observaciones precisas del FCM a todo el cielo. La nave espacial *Planck*, cuyo lanzamiento está previsto para 2007, levantará un mapa aún más exacto. Se espera que estas observaciones desentierren un tesoro de informaciones acerca del universo primitivo.

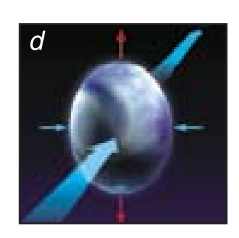
En particular, se confía en hallar pruebas directas de la existencia de la época de inflación. La más contundente sería la observación de ondas gravitatorias inflacionarias. Albert Einstein predijo en 1918, como consecuencia de su teoría de la relatividad general, la existencia de ondas gravitatorias, perturbaciones en movimiento del campo gravitatorio análogas a las del campo electromagnético, las ondas electromagnéticas (rayos X, ondas de radio, luz visible). Lo mismo que la luz y las ondas de radio, las ondas gravitatorias portan información y energía de las fuentes que las producen. Pueden, además, propagarse sin impedimentos de materia que absorbería todas las formas de radiación electromagnética. Así como, gracias a los rayos X, los médicos ven a través de sustancias en las que no puede penetrar la luz visible, deberían las ondas gravitatorias permitir que los

ROBERT R. CALDWELL y MARC KAMIONKOWSKI hicieron juntos la carrera de físicas en la Universidad de Washington. Para el doctorado el primero escogió la de Wisconsin en Milwaukee y el segundo la de Chicago. Caldwell, uno de los creadores de la teoría de la quintaesencia, enseña en el Colegio Dartmouth. Kamionkowski, docente en el Instituto de Tecnología de California, recibió el premio Warner de 1998 por sus contribuciones a la astronomía teórica.











2. ONDAS GRAVITATORIAS

Nunca se han observado directamente ondas gravitatorias, pero la teoría predice que se las puede detectar porque estiran y comprimen el espacio que atraviesan. Si una da en una masa esférica (*a*), primero la estirará en una dirección y la comprimirá en la perpendicular a ésa (*b*). Luego, los efectos se invertirán (*c*); las distorsiones oscilarán a la frecuencia de la onda (*d* y *e*). Las distorsiones que se ven aquí están muy exageradas; las ondas gravitatorias son, por norma, demasiado débiles para producir efectos mensurables.

3. EL UNIVERSO DISTORSIONADO

La expansión fantásticamente rápida del universo justo después de la gran explosión hubo de producir ondas gravitatorias que estiraron y comprimieron el plasma primordial y crearon así movimientos en la superficie esférica que emitió la radiación del fondo cósmico de microondas (FCM). Esos movimientos, a su vez, causarían desplazamientos al rojo y al azul de la temperatura de la radiación y polarizarían el FCM. Esta figura muestra los efectos de una onda gravitatoria que viaja de polo a polo con una longitud de onda de un cuarto del radio de la esfera.

investigadores se asomaran a fenómenos astrofísicos que no pueden observarse de ninguna otra forma más. Aunque no ha habido detección directa de tales ondas, ciertas observaciones astronómicas han confirmado que las parejas de objetos densísimos, estrellas de neutrones o agujeros negros, las generan en la caída en espiral de un componente del dúo sobre el otro.

El plasma que llenaba el universo en su primer medio millón de años era opaco con respecto a la radiación electromagnética, porque cualquier fotón que se emitía se dispersaba inmediatamente en la sopa de partículas subatómicas. Los astrónomos, pues, no podían observar ninguna señal electromagnética anterior al FCM; en cambio, las ondas gravitatorias sí podían propagarse por el plasma. Más aún, la teoría de la inflación predice que la expansión desbocada del universo 10^{-38} segundos después de la gran explosión produjo ondas gravitatorias. Si el modelo teórico anda en lo cierto, éstas y sus ecos fueron propagándose a través del universo primitivo, y 500.000 años después dejaron, en el fondo cósmico de microondas, leves perturbaciones que hoy podríamos observar.

Las ondas de la inflación

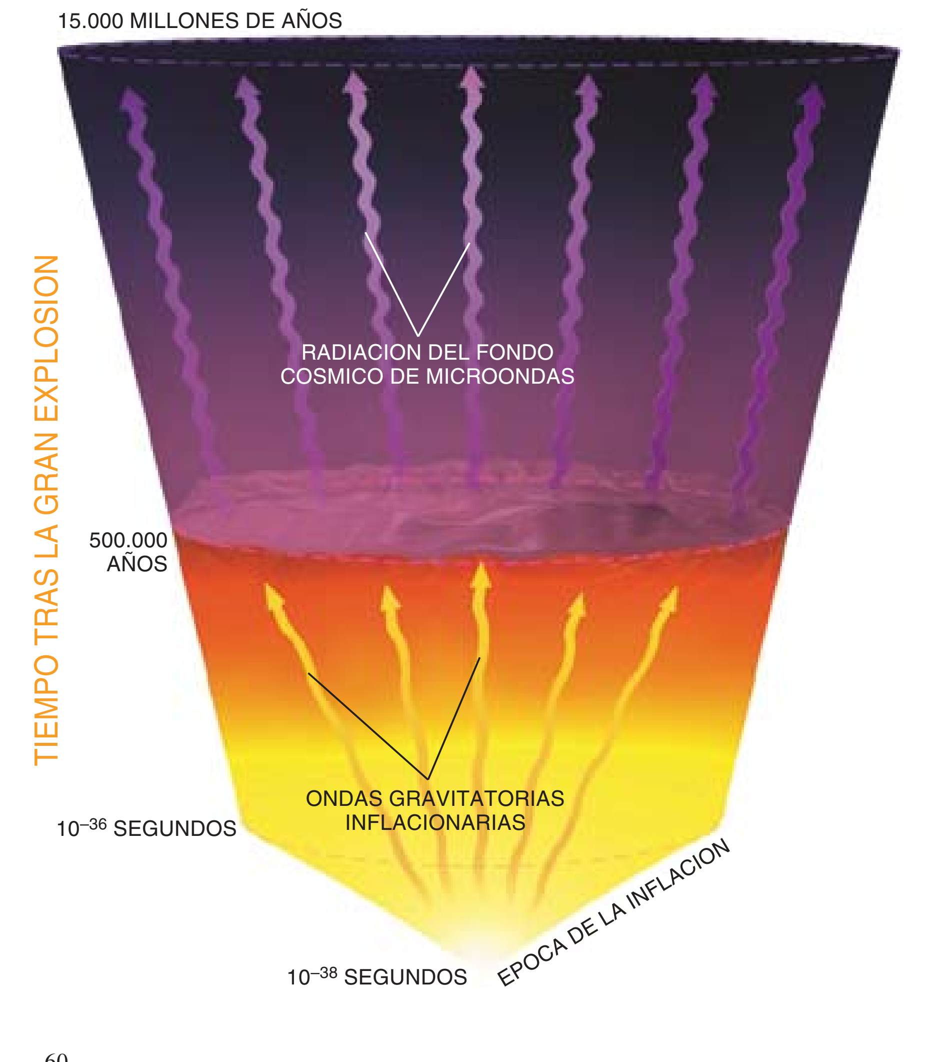
Para hacernos una idea del proceso en cuya virtud la inflación produciría ondas gravitatorias, fijémonos en una consecuencia fascinante de la mecánica cuántica: el espacio vacío no lo está en realidad. Se crean y destruyen espontáneamente pares de partículas sin cesar. El principio de incertidumbre de Heisenberg dice que un par de partículas con energía ΔE puede venir a la existencia de pronto durante un tiempo Δt antes de aniquilarse mutuamente con tal de que $\Delta E\ \Delta t < \hbar/2$, donde $\hbar$ es la constante de Planck reducida ($1{,}055 \times 10^{-34}$ joule segundo). La fórmula vale sólo para las partículas elementales y no se aplica a disposiciones complejas de átomos.

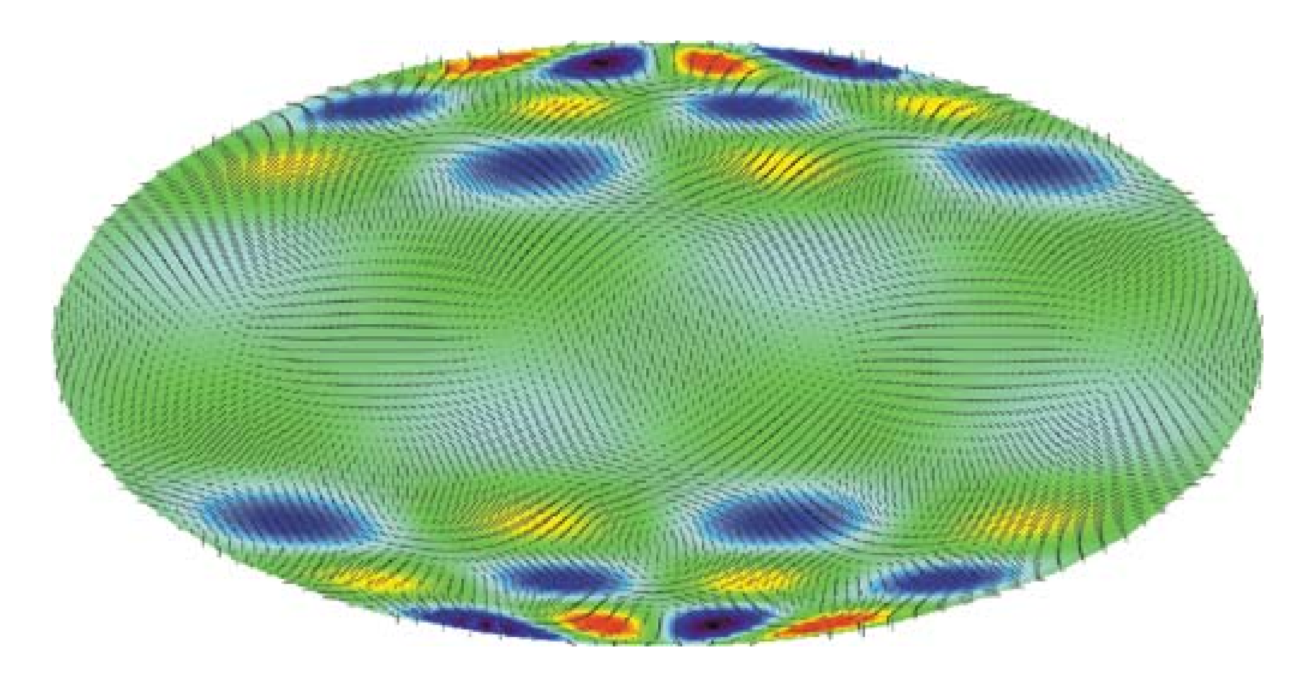
El gravitón es una partícula elemental, la partícula cuántica de las ondas gravitatorias, como el fotón lo es de las electromagnéticas, y le afecta ese proceso. Pares de gravitones virtuales nacen y desaparecen sin solución de continuidad. Durante la inflación, sin embargo, los gravitones virtuales se habrían separado mucho antes de que les diese tiempo a volver al vacío: puede decirse que las partículas virtuales se habrían convertido en reales. Más aún, la fantástica rapidez de la expansión del universo estiraría las longitudes de onda de los gravitones; las antes microscópicas serían ahora macroscópicas. De esa forma, la inflación habría dirigido energía hacia la creación de gravitones y generado un espectro de ondas gravitatorias que reflejaría las condiciones del universo primitivo en esos primeros momentos tras la gran explosión. Si realmente existiesen ondas gravitatorias inflacionarias, constituirían la reliquia más antigua del universo porque se habrían creado 500.000 años antes de que se emitiese la radiación del FCM.

Mientras la radiación del FCM tiene en su mayor parte longitudes de ondas comprendidas entre uno y cinco milímetros (con un pico de intensidad a los dos), las de las ondas gravitatorias inflacionarias abarcarían un intervalo mucho mayor: de un centímetro a 10^{23} kilómetros, el tamaño actual del universo visible. La teoría de la inflación establece que las ondas gravitatorias con mayores longitudes de onda tendrían que ser las más intensas, intensidad que dependería del ritmo al que se expandiese el universo durante la época inflacionaria. Y ese ritmo es proporcional a la escala de energías de la inflación, que viene dada por la temperatura del universo en el momento en que empezara el proceso inflacionario. Como el universo estaba tanto más caliente cuanto menos tiempo hubiese transcurrido desde

4. LA LINEA DE TIEMPO COSMICA

Durante la época de la inflación —la enorme expansión del universo que se produjo en los primeros momentos tras la gran explosión—, los procesos cuánticos generaron un espectro de ondas gravitatorias. Los ecos de las ondas surcaron el plasma primordial y distorsionaron la radiación del FCM que se emitiría medio millón de años más tarde. Mediante la observación meticulosa del FCM podrían detectarse los movimientos del plasma inducidos por las ondas inflacionarias.





5. RELIQUIAS EN LA RADIACION

Las ondas gravitatorias habrían dejado una huella característica en el fondo cósmico de microondas. Este diagrama representa las variaciones de temperatura y los patrones de polarización simulados que producirían las distorsiones de la figura 3. Las manchas rojas y azules representan regiones del FCM más frías y más calientes; los segmentos, el ángulo de la orientación de la polarización en cada región del cielo.

su principio, la intensidad de las ondas gravitatorias depende en última instancia del momento en que empezara la inflación.

Por desgracia, los cosmólogos no pueden precisar ese instante porque no acaban de conocer la causa de la inflación. Según algunos, arrancó cuando tres de las interacciones fundamentales —la fuerte, la débil y la electromagnética— se disociaron a poco de crearse el universo. En el marco de esta teoría, las tres fuerzas eran una sola en el mismísimo comienzo, pero 10^{-38} segundos tras la gran explosión se diferenciaron, y eso terminaría por desencadenar la súbita expansión del cosmos. Si la explicación es correcta, la escala de energías de la inflación debió de estar entre los 10^{15} y los 10^{16} GeV. (Un GeV es la energía que adquiriría un protón si le acelerase una caída de potencial de mil millones de volt. Los mayores aceleradores de partículas actuales alcanzan energías de 10^3 GeV.) Por otra parte, las ondas gravitatorias serían más débiles si la causa de la inflación fuera otro fenómeno físico acontecido más tarde.

Una vez generadas durante la primera fracción de segundo subsecuente a la gran explosión, las ondas gravitatorias inflacionarias se propagarían permanentemente; todavía tendrían que estar surcando el universo. Pero, ¿cómo observarlas? Pensemos en cómo un receptor detecta una señal de radio. Las ondas de radio constan de campos eléctricos y magnéticos oscilantes que hacen que los electrones de la antena vayan y vengan. Los movimientos de estos electrones producen una corriente eléctrica que el receptor capta.

De manera parecida, una onda gravitatoria genera en el espacio que atraviesa dilataciones y contracciones oscilatorias que impartirán pequeños movimientos a un grupo de masas de prueba que floten libremente en él. A finales de los años cincuenta, Hermann Bondi, del King's College de Londres, intentó convencer a los escépticos de la realidad física de esas ondas describiendo un detector hipotético de ondas gravitatorias. El aparato ideal consistía en un par de anillas que colgaban libremente de una barra larga y rígida. Una onda gravitatoria de amplitud h y frecuencia f que lo alcanzase haría que la distancia L entre las dos anillas se contrajese y expandiera en una cuantía $h \times L$ con una frecuencia f. El calor de la fricción de las anillas contra la barra sería la prueba de que la onda gravitatoria transportaba energía.

Ahora se están construyendo detectores de ondas gravitatorias muy depurados que registrarán con rayos láser los minúsculos movimientos de masas suspendidas. La distancia entre las masas de prueba determina la banda de longitudes de onda que los aparatos pueden observar. El mayor de los detectores terrestres, con una separación de cuatro kilómetros entre las masas, podrá medir las oscilaciones causadas por ondas gravitatorias cuyas longitudes de onda estén entre 30 y 30.000 kilómetros. Hay en proyecto un observatorio espacial capaz de detectar longitudes de onda mil veces mayores. Las ondas gravitatorias generadas cuando se funden estrellas de neutrones o cuando chocan agujeros negros tendrán longitudes de onda de esa magnitud y podrán, pues, detectarlas los nuevos instrumentos. Pero las ondas gravitatorias inflacionarias con tales longitudes son demasiado débiles para producir oscilaciones mensurables en los detectores.

Las ondas gravitatorias inflacionarias más intensas son las de longitudes de onda más largas, comparables al diámetro del universo visible. Para detectarlas habría que observar un grupo de masas de prueba separadas por distancias de esa magnitud que flotasen libremente. Da la feliz casualidad de que la naturaleza ofrece un conjunto así: el plasma primordial que emitió la radiación del FCM. Durante los 500.000 años que pasaron entre la época de la inflación y la emisión del FCM recorrieron el universo primitivo los ecos de las ondas gravitatorias ultralargas, y alter-

Los cazadores de ondas

Pronto estarán listos nuevos detectores

Las ondas gravitatorias generadas por los procesos cuánticos que actuaron durante la época inflacionaria no son las únicas que surcan el universo. Muchos sistemas astrofísicos, como las estrellas binarias, las fusiones de estrellas de neutrones y los choques de agujeros negros, emiten también ondas gravitatorias potentes. Según la teoría de la relatividad general, generan ondas todos los sistemas físicos con movimientos internos carentes de simetría esférica. Así, un par de estrellas que giren una alrededor de la otra las producirán, pero una estrella solitaria no.

El problema de la detección de las ondas estriba en su intensidad, que va esfumándose a medida que se extienden. Aunque las uniones de estrellas de neutrones y las colisiones de agujeros negros se cuentan entre los cataclismos más violentos del universo, las ondas gravitatorias que producen son, tras viajar cientos de millones de años luz hacia la Tierra, debilísimas. Por ejemplo, las ondas de un choque de agujeros negros a mil millones de años luz harían que la distancia entre dos masas de prueba que flotasen aquí libremente se dilatase y contrajese alternativamente en una fracción de sólo 10^{-21}, la milmillonésima de una billonésima.

Para medir oscilaciones tan minúsculas se está poniendo a punto el *Observatorio de ondas gravitatorias por medio de interferometría por láser* (LIGO), que cuenta con dos instalaciones, una en Livingston y otra en Hanford (*derecha*). En cada uno de esos emplazamientos, dos tubos de cuatro kilómetros de largo se unen en ángulo recto formado una L gigantesca. Dentro de los tubos van y vienen haces de luz de láser entre espejos muy bien pulidos. Ajustando los haces de manera que interfieran entre sí, se podrán registrar cambios diminutos de las distancias entre los espejos; se medirán oscilaciones de 10^{-17} centímetros (alrededor de la milmillonésima parte del diámetro de un átomo de hidrógeno). Los resultados de las instalaciones de Livingston y Hanford se compararán para descartar fenómenos locales que imiten a las ondas gravitatorias (actividad sísmica, ruido acústico o inestabilidades del láser).

Hay en construcción otros detectores menores que funcionarán asociados al LIGO y con los cuales se podrán triangular las fuentes de las ondas gravitatorias. Ejemplos de observatorios así son TAMA (cerca de Tokio), Virgo (cerca de Pisa) y GEO (cerca de Hannover). Y para seguir las ondas gravitatorias con longitudes de onda mayores, la NASA y la Agencia Espacial Europea tienen previsto lanzar la *Antena espacial de interferometría por láser* en 2010. Constará este detector de tres naves espaciales idénticas que volarán en formación triangular y se dispararán entre sí haces de láser de cinco millones de kilómetros de longitud. Por desgracia, ninguno de estos observatorios propuestos será lo bastante sensible como para distinguir las ondas gravitatorias producidas por la inflación. Sólo la radiación de fondo de microondas podría revelar su presencia.

—R.R.C y M.K.


Livingston, La.


Hanford, Wash.

nativamente dilataron o comprimieron el plasma. Hoy pueden observarse esos movimientos oscilatorios por medio de los ligeros corrimientos Doppler del FCM.

Si, en el momento en que se emitió la radiación del FCM, una onda gravitatoria estaba estirando una región de plasma hacia nosotros, es decir, hacia la parte del universo que acabaría por convertirse en nuestra galaxia, la radiación de esa región les parecerá a los observadores más azul porque está desplazada hacia longitudes de onda más cortas (y, por tanto, a una temperatura mayor). Al revés, si la onda gravitatoria estaba comprimiendo una región de plasma y así la alejaba de nosotros cuando se emitió la radiación del FMC, la radiación parecerá más roja porque se habrá desplazado a longitudes de onda mayores (y a una temperatura menor). Cabe pensar, pues, que la cartografía de las zonas azules y rojas del FMC —que corresponden a temperaturas mayores y menores de la radiación— hará visible el patrón de los movimientos del plasma inducidos por las ondas gravitatorias inflacionarias. El universo mismo se convierte en un detector de ondas gravitatorias.

Las particularidades de la polarización

Pero la cosa no es tan sencilla. Como señalamos al principio del artículo, las inhomogeneidades de masa del universo primitivo produjeron también variaciones de temperatura en el FCM. (En particular, el campo gravitatorio de las regiones más densas de plasma desplazó al

rojo los fotones emitidos desde esas regiones y creó algunas de las diferencias de temperatura observadas por el COBE.) Si se prestase atención sólo a la temperatura de la radiación, no se podría decir qué fracción (si alguna) de las variaciones habría que atribuir a las ondas gravitatorias. Aun así, al menos se sabe que éstas sólo han podido producir una parte en cien mil de las diferencias de temperatura observadas por el COBE y los demás detectores de radiación del FCM. Este límite impone una restricción interesante a los fenómenos físicos que dieron lugar a la inflación: la escala de energía de ésta ha de ser inferior a unos 10^{16} GeV y, por tanto, su época no pudo ser anterior a 10^{-38} segundos después de la gran explosión.

Pero, ¿cómo puede irse más lejos? ¿Cómo se elude la incertidumbre acerca del origen de las fluctuaciones de temperatura? La respuesta se encierra en la polarización del FCM: cuando la luz se proyecta contra una superficie de suerte que su dispersión forme un ángulo casi recto con respecto a la dirección del haz original, se polariza linealmente, es decir, sus ondas se orientan en una dirección particular. En este fenómeno se basan las gafas de sol polarizadas: como la luz solar que dispersa el suelo está de ordinario polarizada en una dirección horizontal, los filtros de las lentes reducen el brillo bloqueando las ondas de luz orientadas así. También el FCM se halla polarizado. Justo antes de que el universo se volviese transparente a la radiación, los fotones del FCM se dispersaron en los electrones del plasma por última vez. Algunos de esos fotones dieron en las partículas con ángulos grandes y la radiación se polarizó.

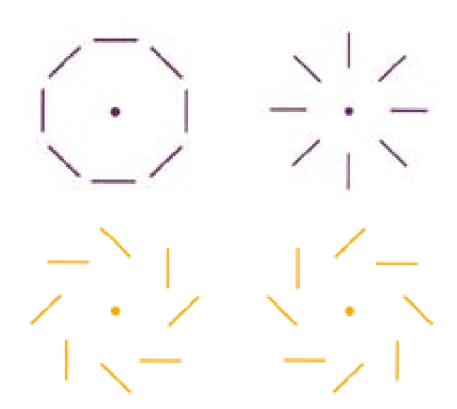
La clave para detectar las ondas gravitatorias inflacionarias se encuentra en el patrón de los movimientos del plasma causados por las ondas, que sería diferente del engendrado por las inhomogeneidades de masa. La idea es harto sencilla. La polarización lineal del FCM puede representarse con pequeños segmentos que indican el ángulo de orientación de la polarización en cada región del cielo. Los segmentos lineales dibujan pautas anulares o radiales. Pero también pueden desarrollar remolinos levógiros o dextrógiros.

En la quiralidad de los patrones postreros se halla la explicación de su origen. Las inhomogeneidades de masa del plasma primordial no pueden haber producido tales patrones de polarización, porque las regiones densas y enrarecidas del plasma no tenían una orientación dextrógira o levógira. En cambio, las ondas gravitatorias sí poseen quiralidad: se propagan con un movimiento como de tornillo dextrógiro o levógiro. El patrón de polarización producido por las ondas gravitatorias parecerá una superposición al azar de muchos remolinos rotatorios de varios tamaños. Se dice que esos patrones presentan rizos, de los que carecen los patrones en forma de anillo o radiales producidos por las inhomogeneidades de masa.

Ni siquiera el observador de vista más aguda podrá mirar un diagrama de polarización, como el de la figura 5, y decir si tiene o no patrones rizados. Pero una extensión del análisis de Fourier —procedimiento matemático que descompone una imagen en una serie de ondas— puede dividir un patrón de polarización en los patrones con y sin rizos que lo constituyen. Por tanto, si puede medirse la polarización del FCM y determinar qué fracción se debe a los patrones rizados, podremos calcular la amplitud de las ondas gravitatorias inflacionarias ultralargas. Como la amplitud de las ondas quedó determinada por la energía de la inflación, se obtendría así una medición directa de esta escala de energía. Tal hallazgo valdría, a su vez, para saber si la inflación fue desencadenada por la unificación de las fuerzas elementales.

¿Cuáles son las perspectivas de que se detecten esos patrones rizados? La nave *MAP* de la NASA y varios aparatos instalados en tierra y en globos se proponen medir la polarización del FCM, pero esos instrumentos no serán, seguramente, lo bastante sensibles como para detectar el componente rizado producido por las ondas gravitatorias inflacionarias. Puede, sin embargo, que experimentos posteriores conozcan mejor suerte. Si la unificación de las fuerzas causó la inflación, su señal en forma de ondas gravitatorias podría ser lo bastante fuerte como para que la detectase la nave *Planck*, aunque quizás hará falta una nueva generación de vehículos espaciales aún más sensibles. Pero si los que desencadenaron la inflación fueron otros fenómenos físicos, que se produjeron más tarde y con energías inferiores, la señal de las ondas gravitatorias será demasiado débil para que se la detecte en un futuro previsible.

Como los cosmólogos no están seguros de cuál fue el origen de la inflación, tampoco pueden predecir la intensidad de la señal de polarización producida por las ondas gravitatorias inflacionarias. Pero si hay una pequeña posibilidad de detectarla, merecerá la pena intentarlo. La detección no sólo ofrecería una prueba inapelable de que hubo inflación, sino que nos ofrecería también la extraordinaria oportunidad de vislumbrar los primerísimos tiempos, sólo 10^{-38} segundos tras la gran explosión. Podríamos entonces pensar en abordar una de las preguntas que más nos han importado siempre: ¿De dónde vino el universo?



6. PATRONES DE POLARIZACION

Puede que la polarización del fondo cósmico de microondas guarde importantes pistas acerca de la historia del universo primitivo. Las variaciones de la densidad del plasma primordial generarían patrones anulares y radiales (*arriba*). Las ondas gravitatorias, por el contrario, producirían remolinos dextrógiros y levógiros (*abajo*).

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FIRST SPACE-BASED GRAVITATIONAL-WAVE DETECTORS. Robert R. Caldwell, Marc Kamionkowski y Leven Wadley en *Physical Review D*, vol. 59, número 2, págs. 27.101-27.300, 15 de enero de 1999.

Las observaciones recientes del fondo cósmico de microondas se describen en estos sitios Web: pupgg.princeton.edu/~cmb/; www.physics.ucsb.edu/~boomerang/; cfpa.berkeley.edu/group/cmb/

Sobre los pormenores acerca de las misiones MAP y Planck visítese map.gsfc.nasa.gov/; astro.estec.esa.nl/astrogen/planck/mission_top.html

Hay más información disponible acerca de los detectores de ondas gravitatorias en www.ligo.caltech.edu; lisa.jpl.nasa.gov

Un cartógrafo cósmico

La *Sonda de la anisotropía del fondo de microondas* proporcionará a los cosmólogos un retrato más preciso del universo temprano

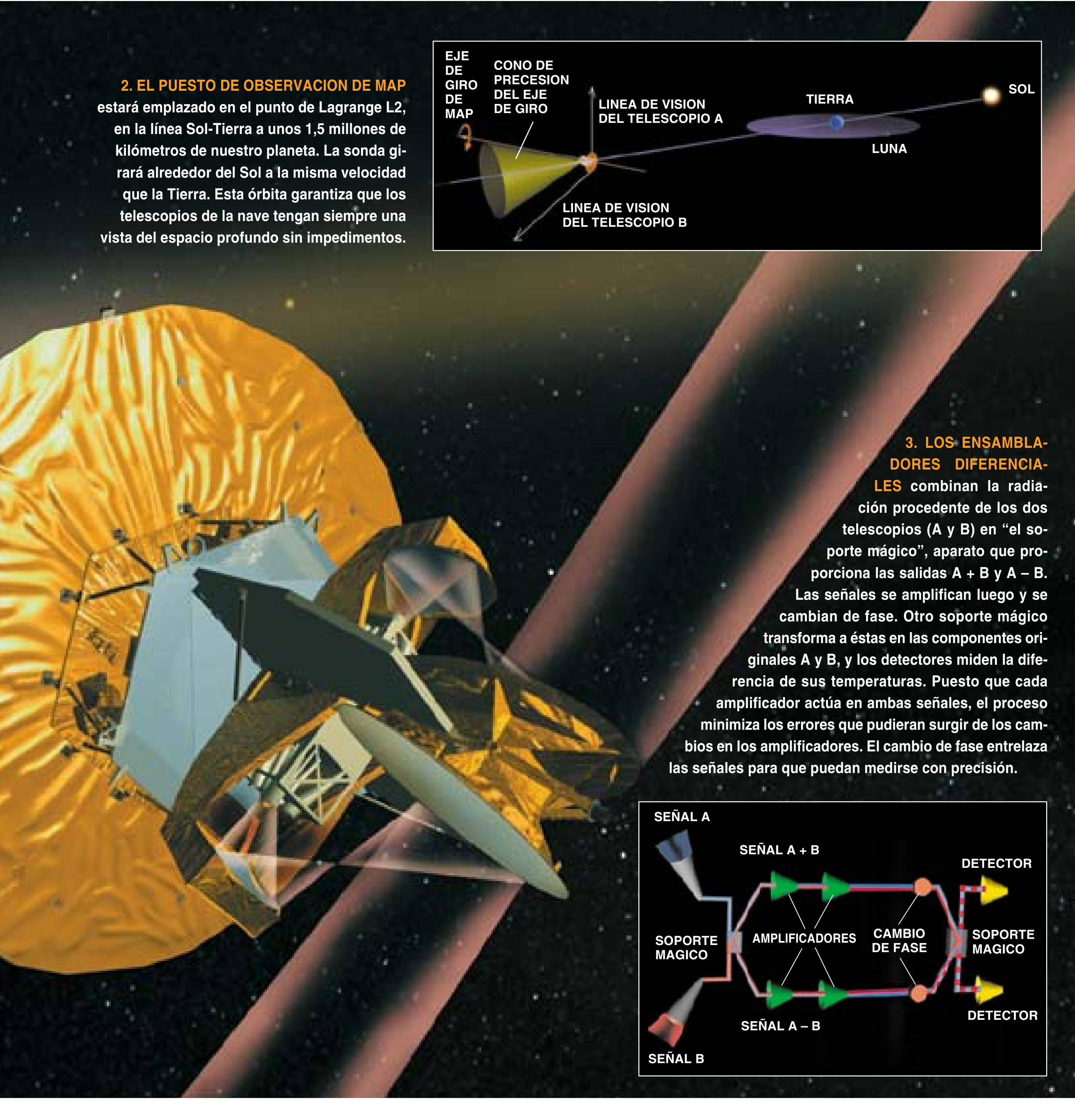
Charles L. Bennett,
Gary F. Hinshaw y Lyman Page

Si el programa se cumple, la Administración Nacional para la Aeronáutica y el Espacio (NASA) lanzará de aquí a unos meses el cohete Delta 2 que transportará una nave espacial de 830 kilogramos y 4 metros de alto. A lo largo del trimestre siguiente, la *Sonda de la anisotropía del fondo de microondas* (MAP) maniobrará hasta instalarse en una órbita alrededor del Sol, a unos 1,5 millones de kilómetros de la órbita terrestre. Comenzará entonces a desarrollar su misión, que durará dos años: observar en todo el cielo la radiación del fondo cósmico de microondas (FCM) con una finura exquisita. Se trata de una radiación emitida hace casi 15.000 millones de años, que no ha interactuado significativamente con nada desde entonces; por consiguiente, el obtener una imagen clara del FCM equivale a dibujar un mapa de la infancia del universo. Con ese mapa en la mano conoceremos la composición, la geometría e historia del cosmos.

La sonda ha de medir la anisotropía del FCM, las variaciones minúsculas de la temperatura de la radiación procedentes de distintas partes del cielo. Estará preparada para detectar diferencias de tan sólo 20 millonésimas de kelvin con respecto a la temperatura promedio de 2,73 kelvin de la radiación. Podrá incluso medir manchas calientes y frías en rangos inferiores a 0,23 grados a lo largo del cielo. Tomará en torno a un millón de medidas. Significa ello que el rastreo de la sonda sobre el FCM será más exhaustivo que los mapas del firmamento producidos, a principios de los noventa, por el *Explorador del fondo de microondas* (COBE), que estaba limitado a una resolución angular de siete grados.

Para alcanzar ese rendimiento mayor, se servirá de dos telescopios de microondas colocados uno contra otro con el fin de concentrar la radiación entrante. Las señales de los telescopios alimentarán a 10 ensambladores diferenciales que analizarán cinco frecuencias del espectro de radiación del FCM. Más que medir la temperatura absoluta de la radiación, cada ensamblador detectará la diferencia de temperaturas entre las señales de los dos telescopios. Puesto que la sonda dará un giro completo cada dos minutos y precesará una vez cada hora, los ensambladores diferenciales podrán comparar las temperaturas de cada punto del cielo con otros mil puntos, generando un conjunto entrelazado de datos.

1. LOS TELESCOPIOS DE LA NAVE ESPACIAL MAP colocados uno contra otro utilizan los reflectores primario y secundario para concentrar la radiación de microondas (*rayos de color rojo*). Los reflectores primarios miden 1,6 × 1,4 metros; los reflectores secundarios son de 1 metro de ancho. La protección que hay en la parte trasera del panel solar (*color naranja*) bloquea la radiación procedente del Sol, de la Tierra y de la Luna, evitando así que otra radiación perdida penetre en los instrumentos. Las microondas procedentes de cada telescopio entran en 10 "conos de alimentación" (*color beige*) diseñados para muestrear cinco frecuencias distintas. Los cuatro conos estrechos del centro operan a 90 gigahertz, analizando las microondas de 3 milímetros de longitud de onda. Los conos más anchos de la periferia reciben a las microondas de 22, 30, 40 y 60 gigahertz. En la base de cada cono existe un aparato que divide la radiación en dos polarizaciones ortogonales; éstas alimentan a ensambladores diferenciales independientes (*recuadro inferior*).



2. EL PUESTO DE OBSERVACION DE MAP estará emplazado en el punto de Lagrange L2, en la línea Sol-Tierra a unos 1,5 millones de kilómetros de nuestro planeta. La sonda girará alrededor del Sol a la misma velocidad que la Tierra. Esta órbita garantiza que los telescopios de la nave tengan siempre una vista del espacio profundo sin impedimentos.

3. LOS ENSAMBLADORES DIFERENCIALES combinan la radiación procedente de los dos telescopios (A y B) en "el soporte mágico", aparato que proporciona las salidas A + B y A – B. Las señales se amplifican luego y se cambian de fase. Otro soporte mágico transforma a éstas en las componentes originales A y B, y los detectores miden la diferencia de sus temperaturas. Puesto que cada amplificador actúa en ambas señales, el proceso minimiza los errores que pudieran surgir de los cambios en los amplificadores. El cambio de fase entrelaza las señales para que puedan medirse con precisión.

Este método cancelará los errores que pudieran resultar de los cambios registrado en la temperatura de la propia nave. La calibración global de los datos se realizará a través de la medición continua utilizando una medida del momento dipolar del FCM, el cambio en la temperatura de la radiación originado por el movimiento de traslación de la Tierra. La sonda eliminará cualquier señal espuria que pudiera contaminar las mediciones del FCM. Si todo marcha como se espera, proporcionará un mapa del firmamento con una fidelidad sin precedentes.

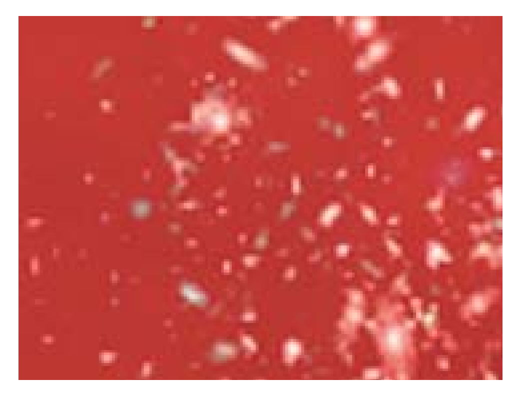
El equipo científico de la nave espacial MAP está integrado por Charles L. Bennett (Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA, GSFC), Mark Halpern (Universidad de la Columbia Británica), Gary Hinshaw (NASA GSFC), Norman C. Jarosik (Universidad de Princeton), Alan J. Kogut (NASA GSFC), Michele Limon (Princeton), Stephan S. Meyer (Universidad de Chicago), Lyman Page (Princeton), David N. Spergel (Princeton), Gregory S. Tucker (Universidad de Brown), David. T. Wilkinson (Princeton), Edward J. Wollack (NASA GSFC) y Edward L. Wright (Universidad de California en Los Angeles).

El universo y su quintaesencia



El universo aparece gobernado por un campo de energía invisible, agente de su expansión acelerada

Jeremiah P. Ostriker y Paul J. Steinhardt



1. UN NUEVO DOMINIO
A escalas en las que las propias galaxias son pequeños bocaditos, parece reinar una gran "energía oscura".

¿No hay nada más que decir? ¿Entendemos el cosmos, salvo detalles nimios? Tal parecía, escasos años atrás. Después de un siglo de acalorados debates, la ciencia había llegado a un cuerpo de doctrina comúnmente admitido sobre las líneas esenciales de la historia del universo. Todo comenzaría con gas y radiación sometidos a temperaturas y densidades altísimas. Se irían expandiendo y enfriando a lo largo de 15.000 millones de años. Las galaxias y otras estructuras complejas se desarrollarían a partir de unas semillas microscópicas —las fluctuaciones cuánticas—, estirándose hasta un tamaño cósmico en un período breve de "inflación". Sólo una pequeña fracción de la materia estaría formada por los elementos químicos de nuestra experiencia diaria. En su proporción mayor se hallaría constituida por materia oscura, partículas elementales exóticas que no interactúan con la luz. Pese a los misterios por resolver, tal sería, a grandes trazos, el cuadro.

O eso era lo que pensábamos. Pero resulta que nos habíamos perdido la mayor parte de la historia. En los últimos cinco años las observaciones han convencido a los cosmólogos de que los elementos químicos y la materia oscura, en conjunto, constituyen menos de la mitad del contenido del universo. El grueso se lo lleva una "energía oscura" omnipresente, dotada de una curiosa propiedad: su gravedad no ejerce una fuerza de atracción. Repele. Por la gravedad, elementos químicos y materia oscura se ven forzados a crear estrellas y galaxias; por su gravedad repulsiva la energía oscura forma una neblina casi homogénea que baña el espacio.

El universo es un campo de batalla entre dos tendencias, donde triunfa la gravedad repulsiva. Poco a poco va venciendo a la fuerza atractiva de la materia común; en virtud de ello, provoca que el universo se acelere continuamente a ritmos de expansión cada vez mayores, conduciéndolo quizás hacia una nueva fase inflacionaria y hacia un futuro totalmente diferente del que los cosmólogos imaginaban diez años atrás.

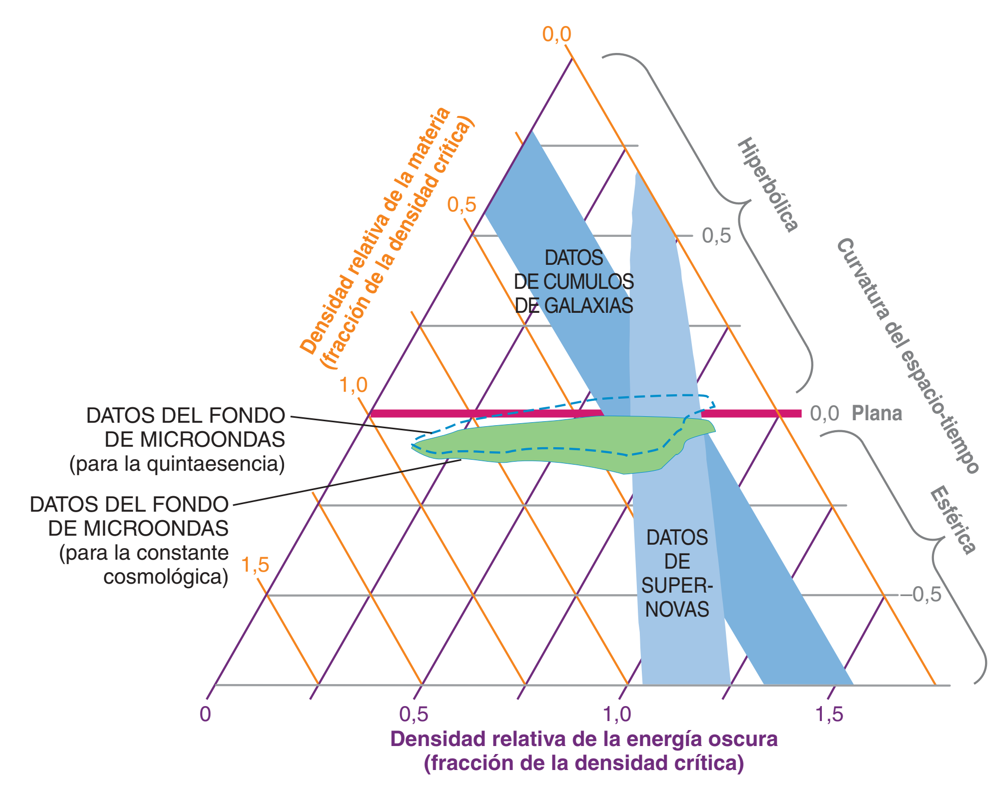
Hasta hace poco, la ciencia se había centrado en confirmar la existencia de la energía oscura. Su atención se dirige ahora hacia un problema más profundo: ¿de dónde viene esa energía? Lo más plausible es que sea inherente a la construcción del espacio. Aun cuando cierto volumen del espacio estuviera vacío del todo —sin ningún residuo de materia o radiación— seguiría alojando la energía en cuestión. Esta constituye una noción respetable desde Albert Einstein y su intento, en 1917, de elaborar un modelo estático del universo. Igual que Isaac Newton y otros científicos eximios, Einstein creía en un universo inalterable, sin contracción ni expansión. Para establecer su teoría de la relatividad general, tuvo que incluir una energía de vacío o, por emplear su terminología, una constante cosmológica. Ajustó el valor de la constante de suerte tal, que la repulsión gravitatoria se viera exactamente compensada con la atracción gravitatoria de la materia.

Más tarde, cuando los astrónomos establecieron la expansión del cosmos, Einstein se arrepintió de su delicado ajuste artificial. Lo consideró su mayor error. Pero quizá su duro juicio pecó de apresuramiento. Si la constante cosmológica tuviera un valor ligeramente mayor del que Einstein propuso, la repulsión superaría a la atracción de la materia y se aceleraría la expansión cósmica.

Muchos cosmólogos, no obstante, se inclinan ahora por otra idea distinta, conocida como "quintaesencia". La traducción sería "el quinto elemento", en alusión a la filosofía griega, que describía un universo formado por los "elementos" tierra, aire, fuego y agua, más una sustancia sutil que impediría que la Luna y los planetas se desplomaran sobre el centro de la esfera celeste. Hace tres años, Robert R. Caldwell, Rahul Dave y uno de los autores (Steinhardt), entonces en la Universidad de Pennsylvania, adoptamos el término con otro significado: un campo cuántico y dinámico, no distinto de los campos eléctricos o magnéticos, que repele gravitatoriamente.

En la quintaesencia lo que los cosmólogos encuentran fascinante es su dinamismo. Toda teoría de la energía oscura halla su principal reto en la justificación de la cantidad nece-

JEREMIAH P. OSTRIKER y PAUL J. STEINHARDT, catedráticos de la Universidad de Princeton, han venido colaborando durante los últimos seis años. Sus ideas sobre la expansión acelerada en 1995 han recibido el respaldo de los resultados recientes en observaciones de supernovas. Ostriker fue uno de los primeros en apreciar la importancia de la materia oscura. Steinhardt, uno de los creadores de la teoría de inflación y del concepto de los cuasicristales, ha reintroducido el término "quintaesencia" en cosmología, tras consultarlo con sus hijos.



2. EL TRIANGULO COSMICO

En esta gráfica de observaciones cosmológicas, los ejes representan los valores posibles de tres características decisivas del universo. Si el universo fuera plano, tal y como sugiere la teoría inflacionaria, los tipos diferentes de observaciones (*áreas coloreadas*) y la línea de curvatura cero (*línea roja*) deberían superponerse. Hoy día, los datos del fondo de microondas facilitan una mejor superposición si la energía oscura consistiera en quintaesencia (*línea discontinua*) más que si ésta fuera la constante cosmológica (*área verde*).

saria de la misma; no excesiva, que impediría la formación de estrellas y galaxias, aunque sí la suficiente para que sus efectos se sientan todavía hoy. La energía de vacío es completamente inerte, manteniéndose siempre a la misma densidad. Por consiguiente, para explicar la cantidad actual de energía oscura, el valor de la constante cosmológica tendría que estar finamente ajustado en la creación del universo para que poseyera el valor idóneo, razón por la cual esa constante presenta el aire de un factor harto confuso. En contraste con ello, la quintaesencia interactúa con la materia y evoluciona con el tiempo, por lo que podría naturalmente ajustarse para alcanzar el valor observado hoy.

Dos tercios de realidad

La distinción entre ambas opciones reviste interés máximo. Los físicos de partículas recurrieron a los aceleradores de altas energías para descubrir nuevas formas de energía y materia. Ahora, el propio cosmos nos revela una clase de energía sin precedentes, sutilmente dispersa; de tan débil interacción, que escapa a la capacidad detectora de los aceleradores. Para desarrollar una teoría fundamental de la naturaleza resulta imperioso establecer si esta energía es inerte o dinámica. Los físicos de partículas se han percatado de que deben estar pendientes de los avances en el cielo, no menos que de los progresos en los aceleradores.

La investigación de la energía oscura se ha ido consolidando paso a paso a lo largo de los últimos diez años. El primero se dio con la elaboración del censo de toda la materia contenida en las galaxias y en los cúmulos galácticos; se emplearon técnicas ópticas, de rayos X y de radio. Se determinó que la masa total almacenada en los elementos químicos y en la materia oscura da cuenta sólo de un tercio aproximadamente de la cantidad global que la mayoría de los teóricos predicen, la llamada densidad crítica.

Muchos cosmólogos se acogieron a ese resultado para poner en tela de juicio los postulados teóricos. Estaríamos viviendo en un universo en permanente expansión, cuyo espacio sería curvo hiperbólico, como la salida de una trompeta [*véase* "Inflación en un universo de baja densidad", por Martin A. Bucher y David N. Spergel; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1999]. Pero semejante interpretación quedó descartada tras las mediciones de manchas calientes y frías de la radiación del fondo de microondas, cuya distribución demuestra que el espacio es plano y que la densidad total de energía es igual a la densidad crítica. Si engarzamos las dos observaciones y recurrimos a una aritmética simple, advertiremos la necesidad de una componente energética adicional que dé cuenta de los dos tercios de la densidad de energía perdida.

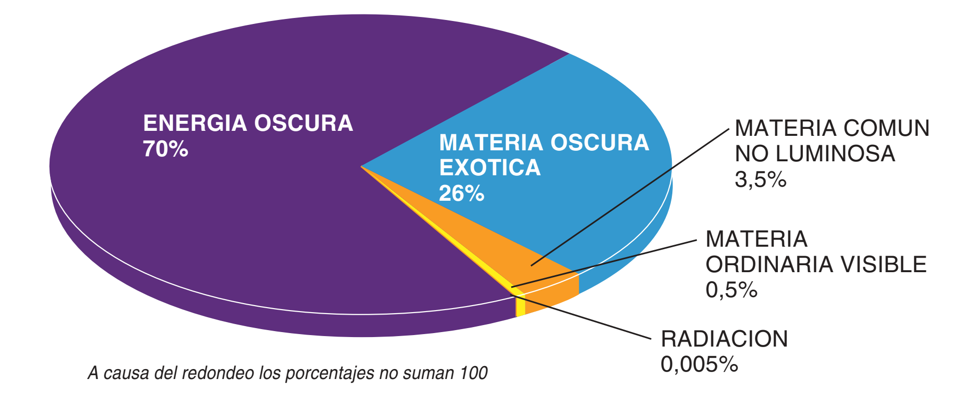
Cualquiera que sea su naturaleza, la nueva componente habrá de ser oscura, ni absorberá ni emitirá luz, pues si lo hiciera se habría detectado ya. En eso se asemeja a la materia oscura. Pero la nueva componente —llamada energía oscura— difiere de la materia oscura en un aspecto crucial: debe ser gravitatoriamente repulsiva, pues de lo contrario la energía oscura habría sido arrastrada hacia las galaxias y los cúmulos, donde hubiera afectado al movimiento de la materia visible. No se ve rastro de tal influencia. No sólo eso. La repulsión gravitatoria resuelve la "crisis de edad" que padeció la cosmología en los años noventa. Si partimos de las medidas actuales de la velocidad de expansión y se supone que ésta se ha ido frenando, la edad del universo se cifra en menos de 12.000 millones de años.

Pero existen pruebas que apuntan a que algunas estrellas de nuestra galaxia tienen 15.000 millones de años. Al provocar la aceleración de ritmo de expansión del universo, la repulsión determina que la edad estimada del cosmos coincida con la edad observada de los objetos celestes [*véase* "Antigravedad cosmológica", por Lawrence M. Krauss; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1999].

El punto flaco potencial de la argumentación residía en que la repulsión gravitatoria acelerase la expansión, fenómeno que aún no se había observado. Pero en 1998 se dio un paso firme. Dos grupos independientes tomaron medidas de supernovas muy distantes y descubrieron un cambio en el ritmo de expansión.

3. LA TARTA DEL UNIVERSO

El ingrediente principal del universo es la "energía oscura", formada o por la constante cosmológica o por la quintaesencia, un campo cuántico. Los otros ingredientes son la materia oscura compuesta de partículas elementales exóticas, de materia común (visible y no luminosa) y de cantidades traza de radiación.



A causa del redondeo los porcentajes no suman 100

Ambos grupos concluyeron que el universo se aceleraba y que lo hacía con el ritmo predicho por la teoría [*véase* "Exploración del espacio-tiempo mediante supernovas", por Craig J. Hogan, Robert P. Kirshner y Nicholas B. Suntzeff; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1999].

Todas estas observaciones reducen lo esencial a tres números: la densidad promedio de la materia (la común y la oscura), la densidad promedio de la energía oscura y la curvatura del espacio. De acuerdo con las ecuaciones de Einstein, las tres cantidades se suman en la densidad crítica. Las posibles combinaciones de los tres números se representan mediante un sencillo diagrama triangular (*véase la figura 1*). Los tres conjuntos de observaciones —el censo de la materia, el fondo cósmico de microondas y las supernovas— se corresponden con tiras del interior del triángulo. Las tres tiras se superponen en la misma posición, lo que es, sin duda, una prueba de la energía oscura.

De la implosión a la explosión

En nuestra experiencia nos las vemos con la materia común, que cumple la ley de la atracción gravitatoria. Nos resulta harto difícil imaginar que la energía oscura pueda repelerse gravitatoriamente. El quid de la cuestión se encierra en su presión, que es negativa. En la ley de Newton de la gravedad, la presión no desempeña ningún papel; la fuerza de la gravedad depende sólo de la masa. En la ley de Einstein de la gravedad, sin embargo, la fuerza de la gravedad depende no sólo de la masa, sino también de otras formas de energía y de la presión. De ese modo, la presión ejerce un doble efecto: directo (originado por la acción de la presión sobre la materia circundante) e indirecto (causado por la gravitación que la presión genera).

El signo de la fuerza gravitatoria se determina por la combinación algebraica de la densidad total de energía más tres veces la presión. Si la presión es positiva, como en el caso de la radiación, la materia común y la materia oscura, entonces la combinación es positiva y la gravitación, atractiva. Si la presión es lo suficientemente negativa, la combinación final resulta también negativa y la gravitación, repulsiva. Para expresarlo de forma cuantitativa, los cosmólogos consideran la relación entre la presión y la densidad de energía, conocida como la ecuación de estado, o "w". Para un gas ordinario, "w" es positivo y proporcional a la temperatura. Pero en algunos sistemas, "w" puede ser negativo. Si su valor es inferior a –1/3, la gravedad es repulsiva.

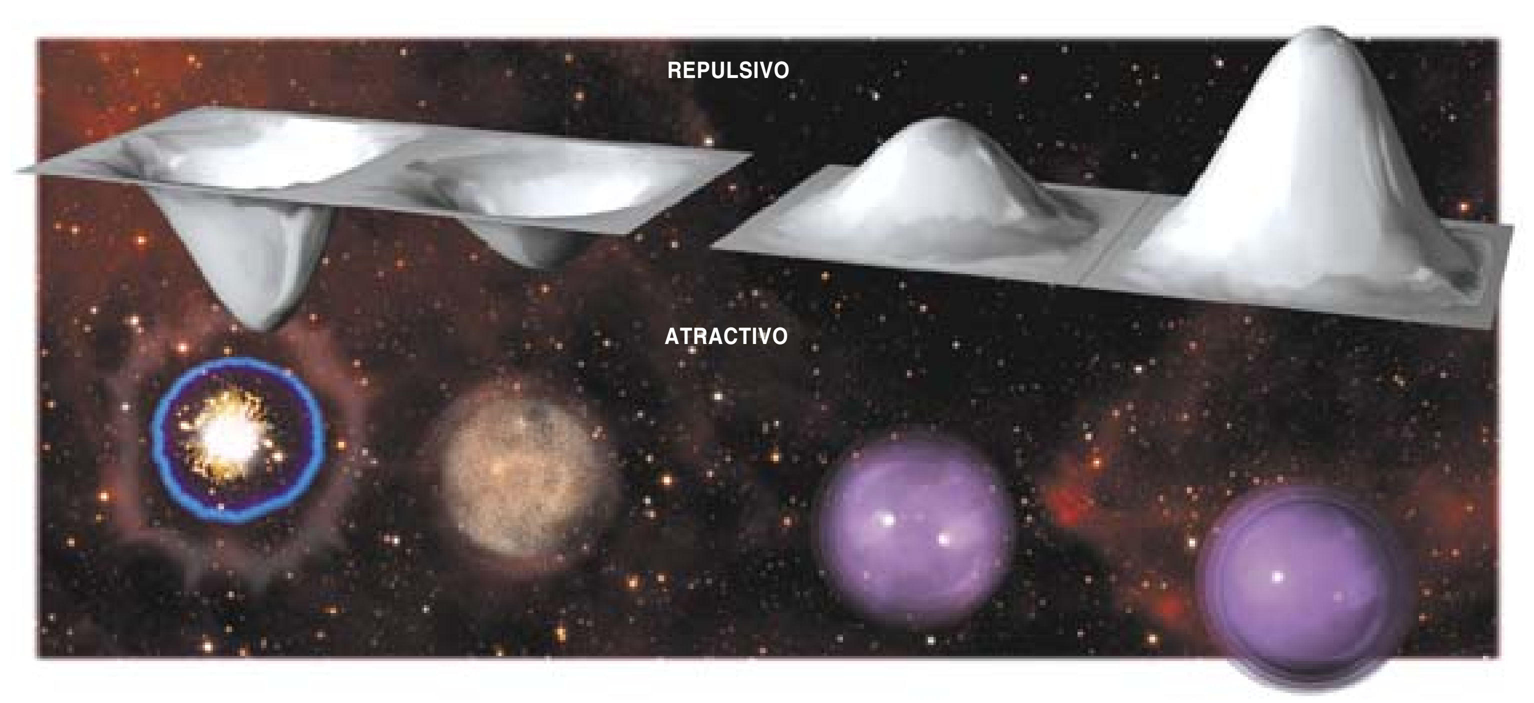
La energía de vacío cumple esta condición (en el supuesto de que su densidad sea positiva). Se trata de una consecuencia de la ley de la conservación de la energía, según la cual la energía nunca puede destruirse. O dicho en términos matemáticos, el ritmo de cambio de la densidad de energía es proporcional a "w + 1". Para la energía de vacío —cuya densidad, por definición, nunca cambia— esta suma debe ser nula. En otras palabras, "w" ha de ser precisamente igual a –1. Por lo que la presión tiene que ser negativa.

¿Qué significa tener una presión negativa? La mayoría de los gases calientes presentan presiones positivas; la energía cinética de los átomos y la radiación los empuja hacia fuera del recipiente. Nótese que el efecto directo de una presión positiva, empujar, se opone al efecto de su gravitación, atraer. Pero cabe imaginar una interacción entre átomos que sobrepase la energía cinética y origine que el gas explote hacia dentro (implosione). El gas implosivo tiene una presión negativa. Un globo con este gas reventaría hacia dentro, ya que la presión del exterior (cero o positiva) excedería a la presión del interior (negativa). Curiosamente, el efecto directo de una presión negativa, implosión, puede ser opuesto al de su gravitación, repulsión.

Una precisión improbable

En un globo el efecto gravitatorio es muy pequeño. Imaginemos, sin embargo, que el espacio entero se llena del gas implosivo. No habría, en este caso, ningún borde superficial ni presión exterior alguna. El gas aún tiene presión negativa, pero no hay nada que lo empuje, por lo que no ejercería efectos directos. Sólo poseería el efecto gravitatorio, es decir, la repulsión. La repulsión ensancha el espacio, aumentando su volumen y, como consecuencia, la cantidad de energía de vacío. Por tanto, la tendencia del ensanchamiento se ve reforzada a sí misma. El universo se expande a un ritmo acelerado. La energía de vacío crece a expensas del campo gravitatorio.

Estos conceptos pueden parecer extraños. También a Einstein le resultaron difíciles de asimilar. El, que consideraba un universo estático, motivación última de la energía de vacío, lo creyó un error desafortunado que no debía haber cometido. Pero la constante cosmológica, una vez introducida, no se desvanecería con facilidad. Los teóricos cayeron en la cuenta de que los campos cuánticos poseían una cantidad finita de energía de vacío, una manifestación de las fluctuaciones cuánticas que producen pares de partículas "virtuales" desde el principio. Una estimación del total de energía de vacío producida por todos los campos conocidos predice una cantidad enorme: 120 órdenes de magnitud más que la densidad de energía de toda la materia. Esto quiere decir que, aunque cueste imaginarlo, las partículas virtuales deberían contribuir con una densidad de



4. PRESION Y GRAVEDAD

El que una cantidad de energía pueda ejercer una fuerza gravitatoria atractiva o repulsiva depende de la presión. Si la presión es nula o positiva, como es el caso de la radiación y de la materia común, la gravedad es atractiva. (Las depresiones —valles— representan los pozos de energía potencial.) La radiación tiene una mayor presión, por lo que su gravedad es más atractiva. En el caso de la quintaesencia, la presión es negativa y la gravedad es repulsiva (las depresiones se convierten en colinas, los picos).

energía constante y positiva, lo que a su vez implicaría una presión negativa. Ahora bien, si esta estimación es correcta, la aceleración de grandes espacios separaría los átomos, las estrellas y las galaxias. Se trata, a todas luces, de una estimación incorrecta. Uno de los principales objetivos de las teorías unificadas de la gravitación ha sido configurar el motivo.

A tenor de cierta propuesta, alguna simetría no descubierta en la física fundamental cancelaría los efectos mayores, anulando la energía de vacío. Por ejemplo, las fluctuaciones cuánticas de los pares de partículas virtuales contribuyen con energía positiva a las partículas con espín semientero (el de quarks y electrones), pero con una energía negativa a las partículas con espín entero (los fotones). En las teorías estándar, la cancelación es inexacta, y deja de lado una densidad de energía inaceptablemente grande. Pero los físicos han explorado los modelos con la llamada supersimetría, una relación entre los dos tipos de partículas que puede conducir a una cancelación exacta. Adolece, sin embargo, de un grave inconveniente: la supersimetría sería válida sólo para muy altas energías. Los teóricos siguen buscando una forma de preservar los efectos de cancelación incluso a bajas energías.

En otro cuadro teórico, la energía de vacío no se anularía con exactitud. Habría, quizás, algún mecanismo de cancelación imperfecto. En vez de otorgar a la constante cosmológica el valor de exactamente cero, el mecanismo sólo cancelaría hasta el 120 decimal. Entonces, la energía de vacío constituiría los dos tercios perdidos del universo. Con todo, esto resulta muy confuso. ¿Qué mecanismo podría operar con tal precisión? Aunque la energía oscura represente una cantidad enorme de masa, se extiende de forma tan sutil que su energía es inferior a 4 electronvolt por milímetro cúbico, lo que para un físico de partículas es extremadamente bajo. La fuerza más débil conocida en la naturaleza comporta densidades de energía que son 10^{50} veces superiores.

Si extrapolamos hacia atrás en el tiempo, la energía de vacío se nos ofrece incluso más paradójica. Hoy día la materia y la energía oscura tienen densidades promedio similares. Pero hace miles de millones de años, cuando comenzaron a existir, nuestro universo era del tamaño de un pomelo, por lo que la materia era 100 órdenes de magnitud más densa. La constante cosmológica, sin embargo, habría tenido el mismo valor que ahora. En otras palabras, por cada 10^{100} partes de materia, los procesos físicos habrían generado una parte de energía de vacío; grado éste de exactitud que parece matemáticamente razonable, pero que resulta absurdo en el mundo real. Esta necesidad de un ajuste casi titánico constituye el motivo principal de buscar otras alternativas a la constante cosmológica.

Trabajo de campo

Afortunadamente, la energía de vacío no es el único proceso por el que se producen presiones negativas. Otro mecanismo es una fuente de energía que, en oposición a la energía de vacío, varía en el espacio y en el tiempo, un reino de posibilidades que se resume en la palabra quintaesencia. Para la quintaesencia, “w” no ha de tener valores fijos, aunque ha de ser inferior a –1/3 a fin de que la gravedad sea repulsiva.

La quintaesencia puede adoptar muchas formas. Los modelos más sencillos proponen un campo cuántico cuya energía varía con tal parsimonia que, a primera vista, recuerda una energía de vacío constante. La idea está tomada de la cosmología inflacionaria; allí, un campo cósmico conocido como "inflatón" conduce la expansión en el universo temprano utilizando un mismo mecanismo [*véase* "El universo inflacionario", por Alan H. Guth y Paul K. Steinhardt; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio 1984]. Difieren sobre todo en un punto importante: la quintaesencia es bastante más débil que el "inflatón". Hace ya diez años Christof Wetterich, Bharat Ratra y P. James E. Peebles abordaron la hipótesis.

En el marco de la teoría cuántica, los procesos físicos admiten una descripción sea en términos de campos o sea en términos de partículas. Puesto que la quintaesencia tiene densidades de energía muy pequeñas y varía de forma gradual, una partícula de quintaesencia sería inconcebiblemente ligera y grande, nada menos que del tamaño de un supercúmulo galáctico. Parece, pues, más razonable optar por una descripción mediante campos. La idea de campo nos traslada a una distribución continua de energía que asigna a cada punto del espacio un valor numérico, la intensidad del campo. La energía del campo tiene una componente cinética, que depende de la variación temporal de la intensidad de dicho campo, y una componente potencial, que depende sólo del valor de la intensidad. Conforme el campo cambie, se desplazará el equilibrio entre la energía potencial y la cinética.

En el caso de la energía de vacío, recuérdese que la presión negativa era el resultado directo de la conservación de la energía; impone ésta que cualquier variación de la densidad de energía es proporcional a la suma de la densidad de energía (un número positivo) y la presión. Para la energía de vacío, el cambio es nulo, por lo que la presión tiene que ser negativa. Para la quintaesencia, el cambio es lo suficientemente gradual como para que la presión siga siendo negativa, aunque menos negativa. A esta condición le corresponde tener más energía potencial que cinética.

Al ser menos negativa la presión, la quintaesencia no acelera el universo con la fuerza con que lo hace la energía de vacío. En última instancia, serán los observadores los que decidirán entre las dos. Aunque la quintaesencia se muestra más acorde con los datos disponibles, la distinción no resulta todavía significativa desde el punto de vista estadístico. Además, a diferencia de la energía de vacío, el campo de la quintaesencia puede estar sometido a todo tipo de evoluciones complejas. El valor de w podría ser positivo, luego negativo y, de nuevo, positivo. Podría adoptar valores distintos en lugares diferentes. Pese a que la falta de uniformidad se presume pequeña, podría ser detectable estudiando la radiación del fondo cósmico de microondas.

Una diferencia ulterior radica en la perturbación de la quintaesencia. Las ondas se propagan por ella como las ondas sonoras a través del aire. En el argot científico, la quintaesencia es "blanda". La constante cosmológica de Einstein, por contra, es rígida; no puede modificarse. Lo que da pie a una cuestión interesante. Cualquier forma de energía conocida es blanda hasta cierto punto. Quizá la rigidez sea una idea sin existencia real, en cuyo caso la constante cosmológica constituiría una imposibilidad. La quintaesencia con w cercano a –1 podría ser la aproximación razonable más cercana.

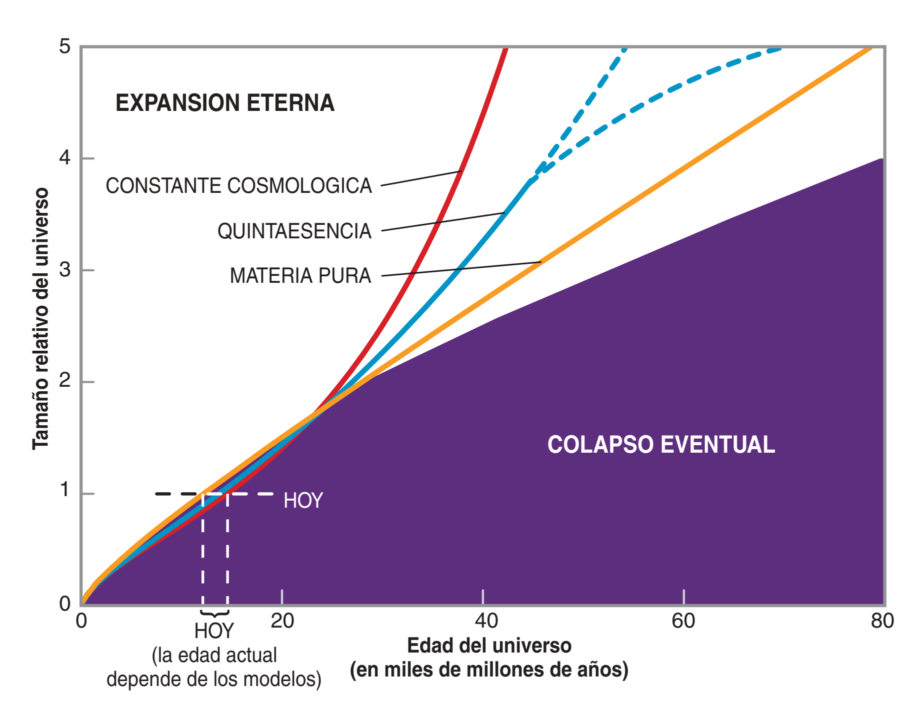
La quintaesencia en las branas

Al afirmar que la quintaesencia es un campo hemos dado el primer paso para explicarla. ¿De dónde puede venir un campo tan extraño como ése? Los físicos de partículas encuentran explicaciones para fenómenos muy dispares, desde la estructura de los átomos hasta el origen de la materia, pero la quintaesencia permanece ayuna de razones. Aunque las teorías modernas de las partículas elementales incluyen muchas clases de campos que cumplen con el comportamiento requerido, no se sabe todavía que sus energías potenciales y cinéticas produzcan presiones negativas.

De acuerdo con cierta hipótesis exótica, la quintaesencia necesita de una física de más dimensiones. En los últimos decenios, se ha venido investigando la teoría de cuerdas, que podría conjugar la relatividad general con la mecánica cuántica en una teoría unificada de las fuerzas fundamentales. Los modelos de cuerdas predicen la existencia de 10 dimensiones, cuatro de las cuales son las tres dimensiones espaciales más el tiempo. Las seis restantes deben estar camufladas. En algunas formula-

5. EXPANSION Y QUINTAESENCIA

El universo se expande a distintos ritmos en función de cuál sea la forma de energía predominante. La materia provoca que el crecimiento se frene, mientras que la constante cosmológica induce su aceleración. La quintaesencia está a mitad de camino: fuerza a que la expansión se acelere, pero más lentamente. Con el tiempo la aceleración podría o no cambiar (*líneas discontinuas*).



ciones, éstas se doblan, como en una pelota cuyo radio, demasiado pequeño, resultara indetectable (al menos para la instrumentación actual). Para otra hipótesis alternativa, la razón se encuentra en una extensión de la teoría de cuerdas, la teoría M (teoría de membranas o simplemente branas), que añade una undécima dimensión: la materia común está confinada en dos superficies tridimensionales llamadas "branas", separadas por un intervalo microscópico a lo largo de la undécima dimensión [*véase* "Nuevas dimensiones para otros universos", por Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos y Georgi Dvali; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 2000].

No estamos capacitados para observar tales dimensiones supernumerarias; ahora bien, si existen, tendríamos que poder percibirlas por vía indirecta. De hecho, la presencia de dimensiones enrolladas o de branas cercanas actuaría como un campo. El valor numérico que el campo asigna a cada punto del espacio podría corresponderse con el radio o con la distancia del intervalo. Si este radio o el intervalo cambiaran lentamente con la expansión del universo, se comportarían exactamente igual que el hipotético campo de la quintaesencia.

Curiosa coincidencia

Cualquiera que sea el origen de la quintaesencia, su dinamismo parece haber solucionado el espinoso problema del ajustado fino. Para abordar tal cuestión podemos preguntarnos por qué la aceleración cósmica comenzó en ese momento particular de la historia. Creada cuando el universo sólo tenía 10^{-35} segundos, la energía oscura debe haber permanecido en la sombra durante casi 10.000 millones de años, un factor que supera en 10^{50} a la edad. Sólo entonces, tal y como sugieren los datos, superó a la materia y determinó que el universo comenzara a acelerarse. ¿No es una coincidencia que, justo cuando los seres pensantes evolucionaron, el universo se acelerara? La suerte de la materia parece haber ido asociada a la de la energía oscura. Pero, ¿cómo?

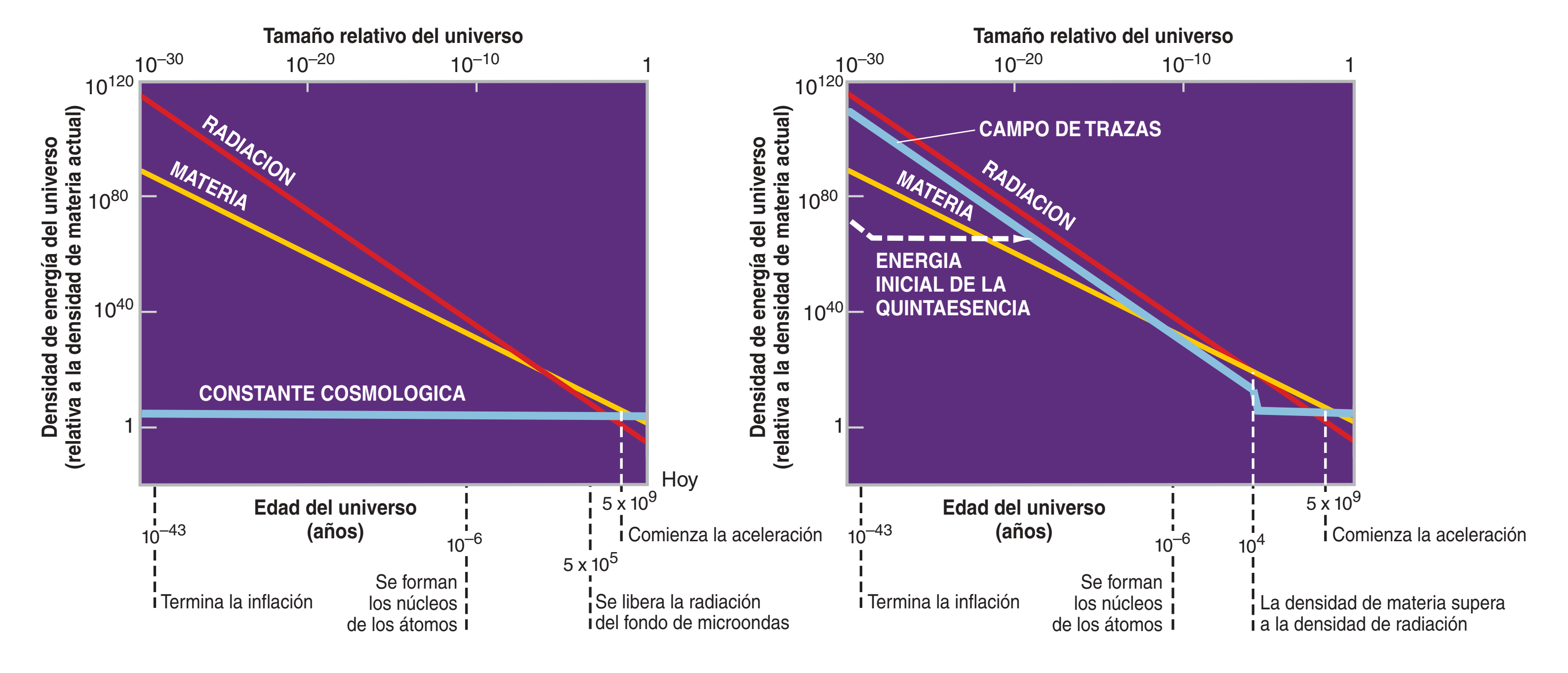
Si la energía oscura es energía de vacío, resulta punto menos que imposible explicar dicha coincidencia. Martin Rees, de la Universidad de Cambridge, y Steven Weinberg, de la de Texas en Austin, han propuesto una explicación antrópica. Quizá nuestro universo sea uno más entre una multitud de universos, en cada uno de los cuales la energía de vacío adopta un valor diferente. Los universos con energías de vacío superiores a 4 electronvolt por milímetro cúbico podrían abundar, pero se expandirían demasiado rápido para la formación de estrellas, planetas y vida. Nuestro universo tendría el valor óptimo. Sólo en éste, "el mejor mundo de todos", podría haber seres inteligentes capaces de contemplar la naturaleza del universo. Pero los físicos discrepan sobre la validez explicativa del argumento antrópico [*véase* "Exploración del universo", por Martin Rees; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero 2000].

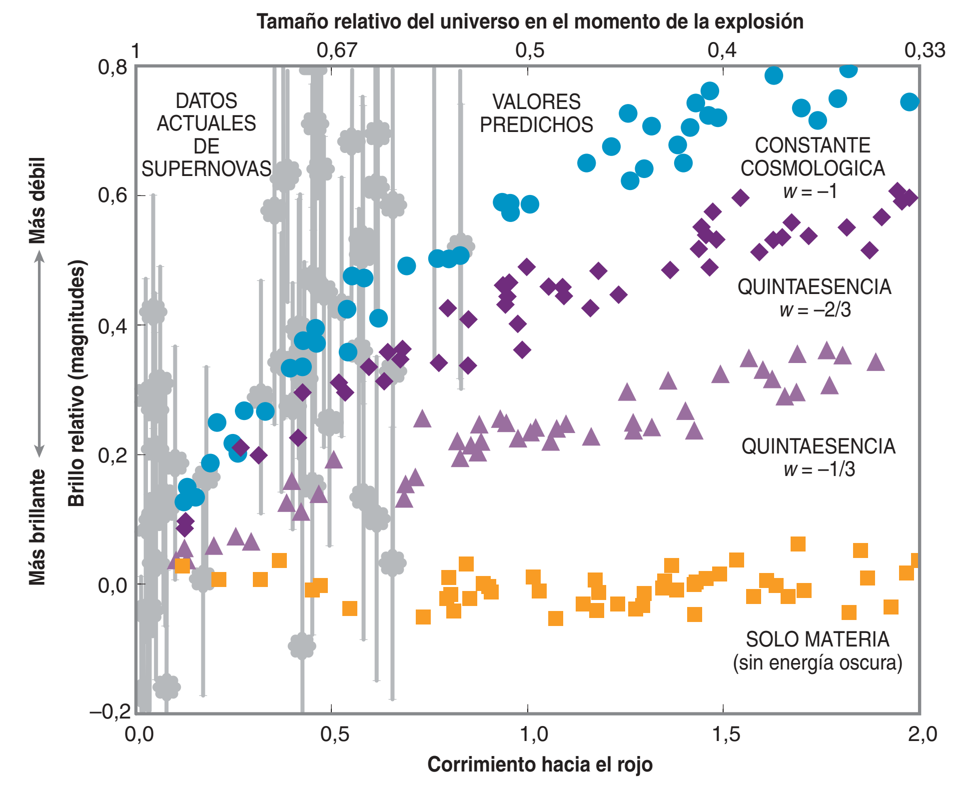
Una respuesta más satisfactoria que incluye una forma de la quintaesencia conocida como campo de trazas, ha sido propuesta por Ratra y Peebles, de Princeton, y por Steinhardt, Ivaylo Zlatev y Limin Wang, de la Universidad de Pennsylvania. Las ecuaciones que describen los campos de trazas tienen un comportamiento clásico de atractor, lo mismo que los que hallamos en ciertos sistemas caóticos. En tales sistemas, el movimiento converge hacia el mismo resultado para un amplio rango de condiciones iniciales; una canica puesta en una bañera vacía siempre cae hacia el desagüe no importa dónde se coloque.

De forma similar, la densidad inicial de energía del campo de trazas no tiene por qué quedar prefijada en un valor determinado, porque el campo

6. CAMPO DE TRAZAS

Si la energía oscura es la constante cosmológica, la densidad de energía debe ajustarse de suerte tal, que supere a la densidad de materia en la historia reciente (*izquierda*). En el caso de la quintaesencia conocida por campo de trazas (*derecha*), cualquier valor inicial de la densidad (*línea discontinua*) convergería en una traza común (*línea azul*), que discurriría paralela con la densidad de radiación hasta que la densidad de materia la superara. Esto provocaría que la densidad del campo de trazas se congelara, desencadenando la aceleración cósmica.





7. CUANDO VER ES CREER

Los datos de las supernovas podrían ser una vía para decidir entre la quintaesencia y la constante cosmológica. Esta última hace que el universo se acelere muy rápidamente, por lo que las supernovas con un determinado corrimiento hacia el rojo se hallarían muy lejanas y, por tanto, serían muy débiles. Los telescopios actuales (*datos mostrados en color gris*) no pueden discernir entre los dos casos, pero la *Sonda de Aceleración de Supernovas* (Supernova Acceleration Probe) podrá. Las magnitudes de las supernovas, según lo predicho por cuatro modelos, se presentan en el diagrama con diferentes colores.

se ajusta a sí mismo rápidamente. Se imbrica en una traza en la que la densidad de energía permanece con un factor casi constante de la densidad de radiación y materia. En este sentido, la quintaesencia imita a la materia y a la radiación, aun cuando su composición difiera por completo. Se da ese parecido porque la densidad de radiación y materia determina el ritmo de expansión cósmica, lo que, a su vez, controla la velocidad a la que se modifica la densidad de la quintaesencia. Considerado más de cerca, se descubre que esta fracción crece de un modo paulatino. En alcanzar su valor final tarda la quintaesencia muchos millones de años, si no miles de millones de años.

¿Por qué la quintaesencia alcanzó su valor cuando lo hizo? La aceleración cósmica podría haber comenzado en el pasado con idéntica facilidad con que podría hacerlo en un futuro remoto; todo depende de la elección de las constantes en la teoría del campo de trazas. Lo que nos lleva de nuevo a las coincidencias. Pero quizá se dio algún suceso en el pasado reciente que desencadenó la aceleración. Steinhardt, junto con Christian Armendáriz Picón y Viatcheslav Mukhanov, de la Universidad Ludwig Maximilian en Munich, sostienen que tal episodio pudo ser la transición del dominio de la radiación al dominio de la materia.

Según la teoría de la gran explosión, la energía del universo se concentraba principalmente en forma de radiación. A medida que el universo se enfriaba, la radiación perdía energía más deprisa que materia. Cuando el universo contaba con unas pocas decenas de miles de años —un tiempo muy corto en términos logarítmicos— el balance de la energía se desplazó a favor de la materia. Este cambio señaló el comienzo de la época dominada por la materia, de la cual nosotros somos beneficiarios. Sólo entonces la gravedad pudo congregar la materia en galaxias y macroestructuras. Al mismo tiempo, cambió la velocidad de expansión del universo.

En cierta variante de los modelos de trazas, tal transformación desencadenó una serie de sucesos que condujeron a la aceleración cósmica actual. A lo largo de la mayor parte de la historia del universo, la quintaesencia persistió relacionada con la energía de radiación; constituía una componente insignificante del cosmos. Pero cuando el universo se convirtió en un dominio de la materia, el cambio en el ritmo expansivo sacó a la quintaesencia de su comportamiento imitador. En vez de seguir a la radiación o incluso a la materia, la presión de la quintaesencia adoptó un valor negativo. Su densidad permaneció casi fija y terminó por sobrepasar la menguante densidad de materia. En un escenario así, el que los seres pensantes y la aceleración cósmica comenzaran a existir casi al mismo tiempo no constituye una mera coincidencia. Ambas, la formación de las estrellas y los planetas necesarios para la vida y la transformación de la quintaesencia en una componente de presión negativa, se desencadenaron con la instauración del dominio de la materia.

Con la mirada en el futuro

Muy pronto, la atención de los cosmólogos se centrará en la detección de la quintaesencia. Presenta, cierto, efectos observables. Puesto que su valor de *w* difiere del de la energía de vacío, provoca un ritmo de aceleración cósmica distinto. Con las mediciones precisas de las supernovas, a lo largo de un amplio rango de distancias, podría discriminarse entre ambos. Los astrónomos han propuesto dos nuevos observatorios con el fin de resolver la cuestión: la *Sonda de Aceleración de Supernovas* y el *Telescopio terrestre de gran apertura para búsquedas*. Los distintos ritmos de aceleración engendran también diferencias pequeñas en el tamaño angular de las manchas calientes y frías de la radiación del fondo cósmico de microondas; deberían detectarlo la *Sonda para la anisotropía del fondo de microondas* y el satélite *Planck*.

Otras pruebas consistirían en medir la variación del número de galaxias con corrimiento hacia el rojo, para averiguar el cambio operado por el ritmo de expansión del universo a lo largo del tiempo. La *Sonda para*

la evolución del espacio extragaláctico profundo, controlada desde tierra, se encargará de ese aspecto.

A más largo plazo, la ciencia deberá asimilar las implicaciones de los descubrimientos, que sin duda nos conducirán a una nueva interpretación del lugar que ocupamos en la historia cósmica. Al principio (entendiendo por tal el inicio del que disponemos alguna pista) existió la inflación, un período de expansión acelerada subsiguiente a la gran explosión. El espacio carecía casi de materia entonces; un campo cuántico parecido a la quintaesencia con su presión negativa comenzó a influir en la historia. En ese período, el universo se expandió un factor mayor de lo que lo ha hecho durante los 15.000 millones de años desde que la inflación terminara. Al final de la inflación, el campo degeneró en gas caliente de quarks, gluones, electrones, luz y energía oscura.

Durante miles de años, el espacio se encontraba empapado de radiación; los átomos no podían siquiera formarse. Hasta que la materia tomó el control. El paso siguiente —nuestra época— es uno de continuo enfriamiento, condensación y de evolución de estructuras complicadas de mayor tamaño. Pero este período se acerca a su fin. La aceleración cósmica remite. El universo que conocemos hoy, con estrellas, galaxias y cúmulos brillantes, parece haber constituido un breve interludio. A medida que la aceleración domine en los próximos 10.000 millones de años, la materia y la energía del universo se diluirán y el espacio se ensanchará tan rápidamente, que se impedirá la formación de nuevas estructuras. Los objetos vivientes encontrarán al cosmos bastante hostil [*véase* “El sino de la vida en el universo”, por Lawrence M. Krauss y Glenn Starkman; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero 2000]. Si la aceleración está causada por la energía de vacío, entonces la historia cósmica ha culminado: los planetas, las estrellas y las galaxias que vemos constituyen el pináculo de la evolución cósmica.

Pero si la aceleración se debe a la quintaesencia, el final está todavía por escribir. El universo podría proseguir en sempiterna aceleración, o la quintaesencia podría degenerar en nuevas formas de materia y radiación repoblando así el universo. Al ser tan exigua la densidad de energía oscura, la materia proveniente de ella podría portar energía insuficiente para engendrar algo de interés. Bajo determinadas condiciones, sin embargo, la quintaesencia podría degenerar a través de la nucleación de burbujas. El interior de la burbuja estaría vacío, pero sus paredes podrían ser lugares de vigorosa actividad. Conforme la pared de la burbuja se desplazara hacia fuera, barrería toda la energía obtenida de la degeneración de la quintaesencia. En algún caso, dos burbujas chocarían con liberación de fantásticas exhibiciones pirotécnicas; se formarían quizá partículas muy masivas como los neutrones y protones, tal vez estrellas y planetas.

A los habitantes del futuro, el universo les parecerá muy inhomogéneo, donde la vida quedaría confinada en islas remotas separadas por inmensos vacíos. ¿Se imaginarán ellos que su origen fue el de un universo homogéneo e isotrópico como el que nosotros contemplamos ahora? ¿Llegarán a saber que el universo estuvo vivo una vez y que murió con el fin de disfrutar de una segunda oportunidad?

Los experimentos podrían ofrecernos pronto alguna idea sobre nuestro futuro. ¿Será el fin mortal de la energía de vacío o el potencial indomeñado de la quintaesencia? Al final, la respuesta dependerá de si la quintaesencia tiene un lugar en la naturaleza, el reino, quizá, de la teoría de cuerdas. Nuestro puesto en la historia cósmica es función de la relación entre la ciencia de lo muy grande y de lo muy pequeño.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

COSMIC CONCORDANCE AND QUINTESSENCE. Limin Wang, R. R. Caldwell, J. P. Ostriker y Paul J. Steinhardt en *Astrophysical Journal*, vol. 530, n.º 1, parte 1, págs. 17-35; 10 de febrero, 2000; astro-ph/ 9901388.

DYNAMICAL SOLUTION TO THE PROBLEM OF A SMALL COSMOLOGICAL CONSTANT AND LATE-TIME COSMIC ACCELERATION. C. Armendáriz Picón, V. Mukhanov y Paul J. Steinhardt en *Physical Review Letters*, volumen 85, n.º 21, páginas 4438-4441; 20 de noviembre, 2000; astro-ph/0004314.

WHY COSMOLOGISTS BELIEVE THE UNIVERSE IS ACCELERATING. Michael S. Turner en *Type Ia Supernovae: Theory and Cosmology*. Dirigido por Jens C. Niemeyer y James W. Truran. Cambridge University Press, 2000; astro-ph/ 9904049.

La energía oscura

Un nuevo nivel de precisión en el estudio de la energía que acelera la expansión del universo ayudará a discernir entre diferentes teorías propuestas para la unificación de las fuerzas fundamentales y podría revelar la presencia de nuevas partículas

Pilar Ruiz-Lapuente

Han transcurrido dos años desde que se encontrara que el ritmo de expansión del universo se acelera por la presencia de una forma de energía desconocida. El método utilizado para esa determinación se basa en el uso de unos indicadores cosmológicos enormemente brillantes y con propiedades similares a lo largo y ancho del universo. En un número reciente de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA (marzo de 1999) describíamos el descubrimiento de la aceleración del universo y dejábamos algunas cuestiones pendientes sobre el aprovechamiento de tales indicadores, explosiones estelares de características uniformes (*véanse los artículos de C. Hogan, R. Kirshner y N. Suntzeff y de P. Ruiz-Lapuente, A. G Kim y N. Walton en ese número*).

De entonces acá hemos logrado despejar algunas incógnitas relativas al uso de este método en el trazado de la evolución del factor de escala del universo y hemos podido comprobar que, frente a otras alternativas, la presencia de una componente de presión negativa parece seguir dando el mejor ajuste. La evolución del brillo aparente de las supernovas a alto corrimiento hacia el rojo cósmico (z) no representa el comportamiento esperado de la existencia de polvo u otro efecto evolutivo alternativo a la aceleración de la expansión, sino que con él se afianza la interpretación cosmológica frente a la interpretación debida a factores ambientales.

Entre otras cuestiones que hacía falta abordar estaba el alzar el listón de corrimiento hacia el rojo a valores mayores que $z = 1$, es decir, ir más lejos de lo que la luz recorre durante la mitad de la edad del universo. Había dificultades técnicas, porque la luz de las supernovas aparece predominantemente en el infrarrojo, lo que obstaculiza las detecciones; el cielo es muy luminoso en este rango espectral. Pero se superó esa barrera con el descubrimiento de supernovas en torno a z = 1-1,3. Una vez más, se ha comprobado su similitud con las de la muestra más cercana.

Para ahondar en la determinación de la causa de la aceleración del universo estamos entrando en una nueva fase de nuestro proyecto. El recurso a supernovas a distintos z constituye, hoy por hoy, la única vía para conocer la naturaleza de la energía oscura. Las mediciones que tomarán las sondas *MAP* y *Planck* resultarán muy útiles para cribar la teoría de la inflación y para determinar la curvatura del universo. Pero no informarán sobre la variación del factor de escala del universo durante la historia de la expansión del mismo. Sólo las supernovas distribuidas en un amplio rango de z dan la medición, en cada momento, de la historia de la evolución del cosmos y revelan la

1. DIAGRAMA DEL INDICE DE LA ECUACION DE ESTADO en el momento actual w_0 y de su derivada respecto al corrimiento al rojo w_1. Las predicciones se señalan en rojo. En este gráfico de Weller y Albrecht se han incluido potenciales posibles dentro de teorías de supergravedad (SUGRA en la figura), potenciales de energía oscura que evolucionan de forma exponencial y otros arbitrarios. Los contornos remiten al refinamiento de la determinación del potencial gracias a la información *a priori* sobre el contenido de materia del universo con un margen de incertidumbre del 15 % (línea negra marcada con la etiqueta σ = 0,15) o inferiores.

influencia de su contenido de energía-materia en la variación de la expansión del cosmos. La información proporcionada por *MAP* y *Planck* complementará la extraída de las supernovas, para ofrecer una imagen global de nuestro universo.

Macrocosmos y microcosmos

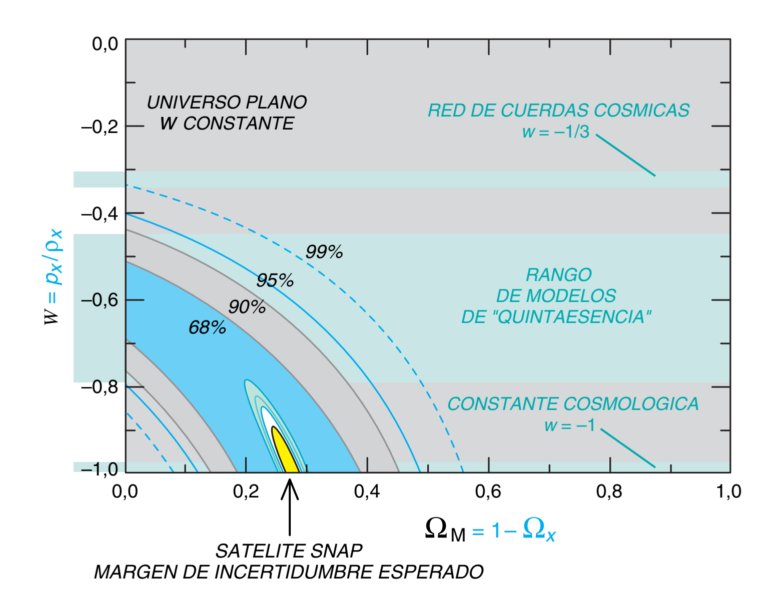
Además, las supernovas distantes pueden proporcionar lo que tantos experimentos de partículas no han conseguido. Para estudiar la interacción gravitatoria, Newton se aplicó a las observaciones del movimiento de los planetas en torno al Sol. Gracias a la descripción de estos movimientos, plasmada en las leyes de Kepler, y a sus propios principios de la mecánica, dedujo la acción a distancia que rige la interacción gravitatoria y formuló la ley que explica su variación con la distancia. A su ejemplo, nosotros, basándonos en la relatividad general, la teoría gravitatoria que mejor describe el cosmos en su globalidad, y sirviéndonos de las supernovas, podemos trazar el comportamiento a distancia de la interacción que está asociada a la quintaesencia o energía oscura.

Se trata de una interacción repulsiva, aunque desconocemos su potencial, función que describe su comportamiento y nos permite calcular el efecto dinámico ejercido sobre el resto de la materia. Esta componente oscura comporta densidades de energía muy bajas; en teoría cuántica de campos, ello corresponde al intercambio de partículas de escasa masa que median en interacciones a largas distancias. Huterer y Turner, de la Universidad de Chicago y del Laboratorio Fermi, sugirieron reconstruir el potencial ligado a esta componente oscura del cosmos mediante la observación de miles de supernovas, con incertidumbres observacionales muy pequeñas. Este tipo de reconstrucción permite comprobar si se trata de energía de vacío o de un campo escalar asociado a una partícula muy ligera. Weller y Andreas Albrecht, de la Universidad de California en Davis, proponen comparar las predicciones para el índice de la ecuación de estado de la energía oscura y su variación en el tiempo con las alternativas que se barajan hoy en día en el terreno de las teorías de unificación de las cuatro fuerzas fundamentales.

¿Qué posibilidades hay? Si echamos una mirada a la cascada de sugerencias y artículos sobre el particular, nos haremos una idea de las distintas direcciones de trabajo de cosmólogos y físicos de partículas. Dado que el mejor ajuste de las observaciones obtenidas hasta la fecha viene aportado por la constante cosmológica, se está intentando comprobar si, desde las últimas propuestas sobre la unificación de las interacciones, las teorías M (teorías de las membranas o, simplemente, branas) que implican la formulación de la física en 11 dimensiones (de las cuales, todas salvo las tres espaciales de nuestra vida diaria y el tiempo quedarían compactas en una fase muy temprana) se puede entender la existencia de un valor bajo de la energía de vacío o constante cosmológica. Las opiniones se dividen entre los que apelan a mecanismos que no cancelarían del todo la energía de vacío y los que creen que su valor natural sería cero. Paul Steinhardt señala que la introducción de una constante cosmológica o de la energía de vacío da lugar a problemas dentro de la formulación de las interacciones en la branas tetradimensionales.

Es posible explorar la energía oscura sin recurrir a formulaciones que necesiten un número de dimensiones superior a cuatro (tres espaciales y la temporal). En concreto se trata de las que conforman nuestra experiencia cotidiana (experiencia limitada de confirmarse el mundo de las branas, ya que sería la del que vive en una membrana tridimensional en un mundo poblado de un cifra mayor de dimensiones). Se puede proyectar el comportamiento de estas teorías multidimensionales en cuatro dimensiones y ver qué efectos se esperan. En particular, una teoría que unifique la gravitación con las otras interacciones tendría un comportamiento como el de la relatividad de Brans-Dicke, teoría que acomoda interacciones variables en el tiempo asociadas a campos escalares que repercuten en variaciones con el tiempo del comportamiento gravitatorio. En particular, esta teoría predice la variación de la "constante *G*" de la gravitación. En el dominio de variación lenta de estos campos, la teoría recupera la gravitación de Einstein. En tal marco situamos las predicciones de variación de la ecuación de estado deducidas de las teorías.

Un acercamiento más cualitativo al estudio de esta energía se centra en encontrar propiedades de su potencial para que, a partir de condiciones arbitrarias, evolucione hacia los valores muy bajos pero no nulos que



2. EL INDICE DE LA ECUACION DE ESTADO obtenido por el Proyecto Supernovas y Cosmología mediante la comparación de la región de valores posibles para candidatos a energía oscura con lo recabado por las observaciones hasta 1998 y el grado de incertidumbre, si se suma un gran número de observaciones con precisión del 2 % en el brillo de las supernovas (http://snap.lbl.gov).

PILAR RUIZ-LAPUENTE, profesora de astrofísica de la Universidad de Barcelona, ha sido investigadora contratada por la Universidad de Harvard e investigadora invitada en el Instituto Max-Planck de Astrofísica. Su labor está contribuyendo a desentrañar la naturaleza física de las explosiones de supernovas y su uso cosmológico. Integrada en el Proyecto Supernovas y Cosmología, ha participado en el descubrimiento de la energía oscura.

medimos hoy (*véase el artículo de Ostriker y Steinhardt en este número*). Esta línea de trabajo guarda similitud con la que inspiró a los teóricos de la inflación a buscar mecanismos que engendraran, a partir de condiciones iniciales arbitrarias, al universo uniforme que observamos.

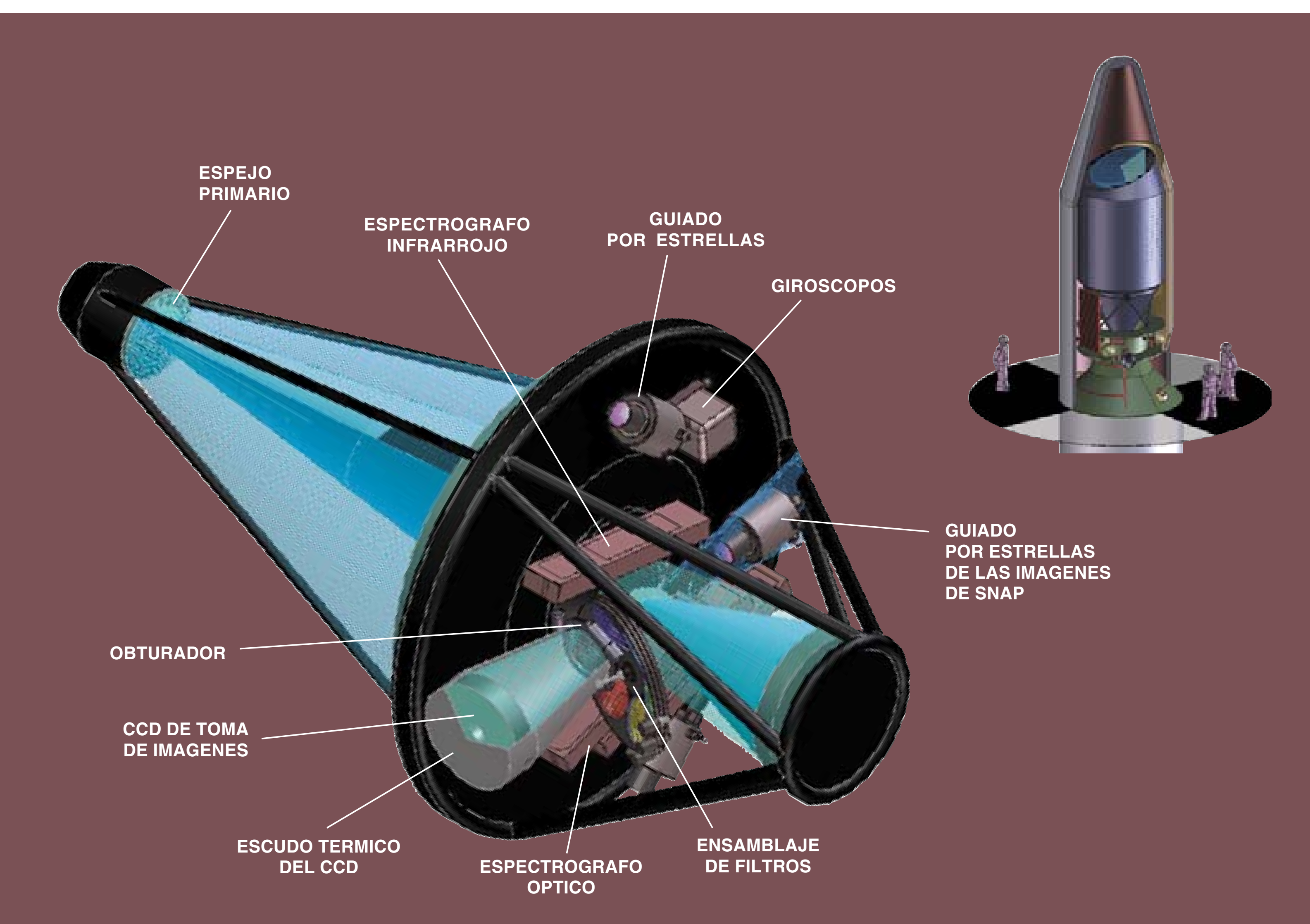
Todas estas formulaciones pueden representarse en diagramas que describen la evolución con z de la magnitud de las supernovas, o en diagramas del valor del índice de la ecuación de estado y de sus derivadas con z. La comprobación de esas descripciones de la energía oscura con las observaciones aportará, por tanto, luz fundamental a lo que sabemos del cosmos a gran escala y a muy pequeña escala. Pero con los datos obtenidos hasta el momento no se puede llegar a la precisión necesaria. ¿Qué se debe modificar para lograr este salto cualitativo?

Una nueva fase

En la nueva fase de nuestro trabajo nos espera la creación de una base de datos que contenga medidas experimentales de supernovas muy lejanas con un grado de error en el brillo del 2 %. El Proyecto Supernovas y Cosmología está preparando la puesta en órbita del telescopio *Sonda Aceleración de Supernovas* (*SNAP*). La decisión de trasladarse al espacio se justifica por la pobre calidad de las observaciones realizadas desde tierra debido a las emisiones y absorciones atmosféricas. El firmamento, desde el espacio, es mucho más oscuro y el diámetro del telescopio necesario para obtener la relación señal-ruido deseada es mucho menor. Además, el seguimiento de la evolución del brillo de las supernovas requiere la observación continuada durante 6 meses, lo cual plantea problemas de visibilidad desde tierra. El telescopio *SNAP* llevará una cámara óptica de 1 grado cuadrado de campo de visión y una pequeña cámara en el infrarrojo cercano. Un espectrógrafo podrá descomponer la luz de las supernovas desde su color ultravioleta cercano hasta el infrarrojo cercano. Se espera que el telescopio descubra miles de supernovas en un año a corrimientos hacia el rojo de hasta 1,7; tomará espectros y curvas de luz de alta razón señal-ruido. Incluso sumando todos los observatorios disponibles en tierra no se podría llegar a acumular una base de datos de ese tamaño y calidad en decenas de años.

Con la base de datos podrá abordarse la naturaleza de la energía oscura y de los parámetros cosmológicos con gran precisión. Se conocerá la densidad de materia del universo dentro del 2 % de error, la densidad de

3. MAQUETA DEL TELESCOPIO ESPACIAL SNAP
(http://snap.lbl.gov)



energía oscura hasta el 5 % y la curvatura del universo hasta un 6 %. Se podrá distinguir entre la energía de vacío o constante cosmológica y otros candidatos a energía oscura, con un buen nivel de confianza.

La misión ayudará, sin duda, a esclarecer otros misterios. Las búsquedas de supernovas a alto *z*, al comparar porciones del cielo en fechas que distan de 2 a 6 semanas entre sí, son sensibles al descubrimiento de todo tipo de objetos variables en el cielo: cuásares que han aumentado su luminosidad, estrellas binarias que entran en fase de erupción, contrapartidas ópticas de los estallidos de rayos gamma (GRB) o asteroides que aparecen en el campo de visión del telescopio. En las campañas de observación realizadas desde el observatorio del Roque de los Muchachos en la isla de La Palma hemos podido apreciar la variabilidad del cosmos, al tiempo que dejábamos registro de estos objetos. Frente a una campaña de observación de varias noches para cubrir medio grado en el cielo, las que hemos efectuado, un telescopio como el mencionado cubrirá con mucha mayor profundidad y amplitud el cielo cada noche y será sin duda único en la investigación de amplios campos de la física.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THERMONUCLEAR SUPERNOVAE. Dirigido por Pilar Ruiz-Lapuente, Ramón Canal y Jordi Isern. Kluwer Academic Publisher 1997.

SUPERNOVAS Y EXPANSIÓN ACELERADA DEL UNIVERSO. Pilar Ruiz-Lapuente, Alex G. Kim y Nicholas Walton, en *Investigación y Ciencia*, n.º 270, marzo, 1999.

EXPLORACIÓN DEL ESPACIO-TIEMPO MEDIANTE SUPERNOVAS. Craig J. Hogan, Robert P. Kirshner y Nicholas B. Suntzeff, en *Investigación y Ciencia*, n.º 270, marzo, 1999.

OPPORTUNITIES FOR FUTURE SUPERNOVA STUDIES OF COSMIC ACCELERATION, J. Weller y A. Albrecht, en *Physical Review D*, 1999. Preprint en xxx.lanl.gov/abs/astro—ph/0008314.

SUPERNOVAE AND COSMOLOGY. Pilar Ruiz-Lapuente, puesta a punto presentada en CAPP2000: Conference on Cosmology and Particle Physics (Verbier, Suiza), ed. Durrer *et al.* (American Institute of Physics) 2000.



El sentido de la cosmología moderna

En busca del orden dentro del enjambre de ideas y teorías

P. James E. Peebles

Corren tiempos excitantes para los cosmólogos. Asistimos a una oleada de descubrimientos, bullen las ideas y ha cobrado nuevo auge la investigación para someter a prueba las nuevas hipótesis. Pero atravesamos también tiempos de confusión. No pueden ser correctas todas las ideas que están sobre el tapete, seguro. Ni siquiera son coherentes entre sí. ¿Cómo juzgar el progreso? Razonaré mi punto de vista.

Los cosmólogos hemos establecido firmemente los fundamentos del campo sobre la refutación de teorías ya periclitadas. En los últimos 70 años hemos reunido pruebas abundantes de que nuestro universo se expande y enfría. En primer lugar, la luz procedente de galaxias remotas está corrida hacia el rojo; así debe ocurrir si el espacio se expande y las galaxias se alejan entre sí. En segundo lugar, un mar de radiación térmica inunda el espacio, de acuerdo con lo que cabe esperar de un espacio que fue más denso y caliente. En tercer lugar, el universo contiene grandes cantidades de deuterio y helio, que es lo que procede si en el pasado las temperaturas fueron mucho más altas. En cuarto lugar, las galaxias parecían, miles de millones de años atrás, nítidamente más jóvenes, según debe suponerse de una era más cercana al tiempo en que no existían galaxias. Por último, la curvatura del espacio-tiempo parece estar relacionada con el contenido de materia del universo, tal y como debería acontecer si el universo se expande de acuerdo con las predicciones de la teoría de Einstein de la gravitación, la relatividad general.

P. JAMES E. PEEBLES, profesor emérito de la Universidad de Princeton, es una de las figuras más autorizadas de la cosmología, en particular por lo que concierne al análisis precoz de la radiación del fondo cósmico de microondas y de la composición del universo. Ha recibido, entre otras distinciones, el premio Heineman y la medalla Henry Norris Russell de la Sociedad Americana de Astronomía.

Que el universo está expandiéndose y enfriándose es la esencia de la teoría de la gran explosión, en el bien entendido de que ésta describe la evolución del universo, pero no cómo empezó.

Suelo comparar el proceso de asentar los resultados, sea en cosmología o en otra ciencia, con el ensamblaje de un marco. Buscamos reforzar cada pieza de prueba mediante el machihembrado de otros tipos de mediciones. Nuestro marco de la expansión del universo está ensamblado con rigidez suficiente como para considerarlo sólido. Nadie cuestiona con seriedad la teoría la gran explosión; todas las piezas encajan de maravilla. Incluso la alternativa más radical —la última encarnación de la teoría del estado estacionario— no pone en duda que el universo se expande y enfría. Todavía se dejarán oír opiniones divergentes en cosmología, pero atañen a los añadidos a la parte consolidada.

Por ejemplo, no sabemos qué hacía el universo antes de expandirse. Una teoría puntera, la de la inflación, es una adición atractiva en el marco mencionado, pero carece de refuerzos firmes. En eso es precisamente en lo que los cosmólogos se afanan ahora. Si las mediciones en marcha están de acuerdo con las huellas de la inflación, entonces las contaremos como un argumento convincente de esta teoría. Pero mientras eso no ocurra, me abstendría de apostar sobre la realidad de la inflación. No estoy criticando la teoría; simplemente quiero señalar que éste es un trabajo arriesgado y nuevo que debe esperar su comprobación.

Más sólidos son los datos que abonan la idea de que la masa del universo consiste en materia oscura agrupada en torno a la periferia de las galaxias. También tenemos respaldo a favor de la denostada constante cosmológica de Einstein o de algo similar; sería el agente



Nuestro marco de la teoría de la gran explosión está apuntalado sólidamente.

FICHA DE LAS PRINCIPALES TEORIAS

Concepto	Nota	Comentarios
El universo evolucionó a partir de un estado más caliente y denso	Sobresaliente alto	Pruebas convincentes obtenidas desde muchos ángulos de la astronomía y la física
El universo se expande tal como predice la teoría de la relatividad general	Sobresaliente bajo	Pasa los exámenes, pero muy pocos de tales exámenes han sido exigentes
La materia oscura constituida por partículas exóticas domina las galaxias	Notable alto	Muchas líneas de pruebas indirectas, pero hay que encontrar todavía las partículas y descartar las teorías alternativas
La mayor parte de masa del universo se distribuye de forma suave; actúa de acuerdo con la constante cosmológica de Einstein, causando la aceleración de la expansión	Notable bajo	Prometedor ajuste de medidas recientes, pero tiene que hacerse mucho más para depurar las pruebas y resolver problemas teóricos
El universo creció de la inflación	Incompleto	Elegante, aunque carece de pruebas directas y requiere una extrapolación enorme de las leyes de la física

de la aceleración que el universo parece estar experimentando. Diez años atrás, los cosmólogos daban la bienvenida a la materia oscura como una forma elegante de explicar los movimientos de las estrellas y el gas en las galaxias. Muchísimos investigadores, sin embargo, mostraban su desagrado ante la constante cosmológica. Hoy la mayoría la aceptan, o su concepto aliado, la quintaesencia. Los físicos de partículas han recogido el guante que la constante cosmológica lanza a la teoría cuántica. Este cambio de opinión no refleja debilidad, sino que muestra que el campo se encuentra en un estado de caos saludable alrededor de un marco sólido que crece poco a poco. Estudiantes de la naturaleza, ajustamos nuestros conceptos al progreso de las lecciones.

Las enseñanzas, en este caso, incluyen los signos de la aceleración de la expansión: el brillo de las supernovas cercanas y lejanas; la edad de las estrellas más viejas; la curvatura de la luz alrededor de masas remotas, y las fluctuaciones de la temperatura del fondo de radiación térmico del firmamento [*véase* "Informe especial: Revolución en la cosmología", INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1999]. Pese a las pruebas, impresionantes, me siento todavía incómodo respecto a los detalles de la constante cosmológica, incluidas las posibles contradicciones con los resultados de las simulaciones de la evolución de las galaxias y su distribución espacial. La teoría del universo en aceleración es un edificio en construcción. Admiro la arquitectura, pero no quisiera mudarme allí todavía.

Con el tiempo, la inflación, quintaesencia y otros conceptos sometidos a debate o bien estarán sólidamente integrados en el marco central o bien se abandonarán sustituidos por algo mejor. En cierto modo, trabajamos fuera de la obra. Pero el universo es un lugar complicado, y sería necio pensar que agotaremos las líneas de investigación productivas en un tiempo cercano. La confusión es un signo de que estamos haciendo algo bien: es la conmoción fértil de una planta en construcción.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

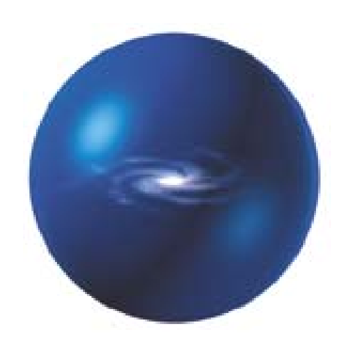
EVOLUCIÓN DEL UNIVERSO. P. James E. Peebles, David N. Schramm, Edwin L. Turner y Richard G. Kron en *Investigación y Ciencia*, diciembre 1994.

THE INFLATIONARY UNIVERSE: THE QUEST FOR A NEW THEORY OF COSMIC ORIGINS. Alan H. Guth. Perseus Press, 1997.

BEFORE THE BEGINNING: OUR UNIVERSE AND OTHERS. Martin Rees. Perseus Press, 1998.

THE ACCELERATING UNIVERSE: INFINITE EXPANSION, THE COSMOLOGICAL CONSTANT, AND THE BEAUTY OF THE COSMOS. Mario Livio y Allan Sandage. John Wiley & Sons, 2000.

CONCLUDING REMARKS ON NEW COSMOLOGICAL DATA AND THE VALUES OF THE FUNDAMENTAL PARAMETERS. P. James E. Peebles en *IAU Symposium 201: New Cosmological Data and the Values of the Fundamental Parameters*. Dirigido por A. N. Lasenby, A. W. Jones y A. Wilkinson; agosto 2000. Borrador disponible en xxx.lanl.gov/abs/astro-ph/0011252 en la Web.



Una nueva teoría del universo

Si el modelo inflacionario falla, ¿cuál es el plan alternativo de la cosmología?

João Magueijo

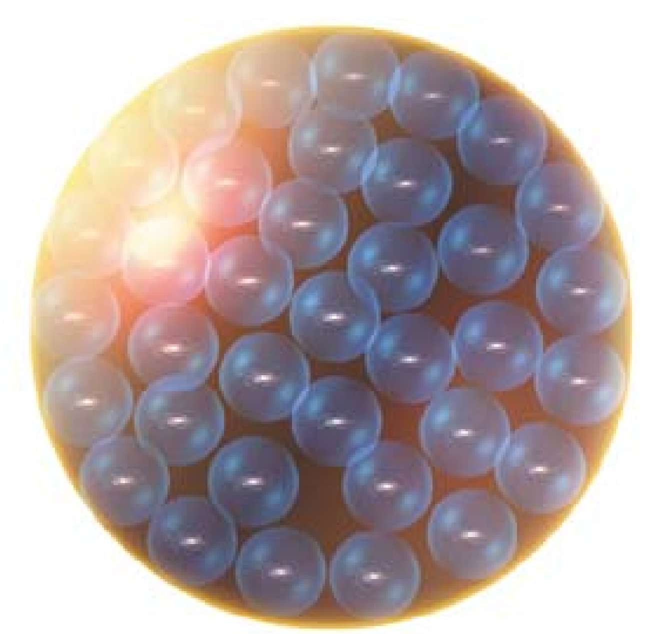
A pesar de que la teoría de la inflación cósmica ha adquirido un aura de invencibilidad, otros modelos alternativos atraen cierto interés entre los cosmólogos. La teoría del estado estacionario, que hasta los años sesenta se reputaba la principal alternativa a la gran explosión, se ha mantenido en un restringido grupo de defensores. La teoría pre-gran explosión, una reformulación de la inflación que ha sido auspiciada por la teoría de cuerdas, ronda por algunas cabezas. Pero la alternativa más prometedora y provocativa quizá sea la teoría de la velocidad variante de la luz (VSL, de *varying-speed-of light theory*), que mis colegas y yo hemos desarrollado durante años. Cuando menos, estos modelos discrepantes añaden color y variedad a la cosmología. Expresan también una duda inquietante: ¿puede el entusiasmo generado por la teoría de la inflación y sus consecuencias ocultar un error monstruoso?

Las teorías cosmológicas dominantes, incluida la de la inflación, parten de un supuesto crucial: la velocidad de la luz y otros parámetros físicos fundamentales han mantenido siempre los mismos valores. (Por eso se les llama constantes.) Punto de arranque que ha forzado a los cosmólogos a adoptar la inflación con todas sus implicaciones fantásticas. Cierto es que los experimentos muestran que las "constantes" no envejecen de una forma drástica. Pero también es verdad que los investigadores han sometido a prueba sus valores sólo en lo que respecta a los últimos miles de millones de años. Postular su constancia sobre la edad entera del universo implica una extrapolación descomunal. ¿Pueden cambiar las constantes con el tiempo en un universo de gran explosión, como lo hacen la temperatura y la densidad?

Los teóricos descubren que algunas constantes se hallan mejor dispuestas que otras a perder su estatuto. Por ejemplo, la constante de la gravitación, G, y la carga del electrón, e, han sido objeto frecuente de esta ordalía teórica causando poco escándalo. Desde el trabajo pionero de Paul Dirac en los años treinta sobre la variación de las constantes hasta las últimas teorías de cuerdas ha estado muy de moda destronar la constancia de G. Por contra, la velocidad de la luz, c, ha resistido incólume. La razón es clara: en la constancia de c y su estatuto como límite de velocidad universal se fundamenta la teoría de la relatividad. Y el atractivo de la relatividad es tal, que la constancia de c se ha incardinado en los útiles matemáticos accesibles al físico. La variación de c no es ya una expresión malsonante, sino una expresión ausente del vocabulario de la física.

Sin embargo, podría ayudar a los cosmólogos a mirar más lejos. En el corazón de la inflación está el problema del horizonte de la cosmología de la gran explosión, que surge de un hecho simple: en cualquier tiempo, la luz —y, por tanto, cualquier interacción— ha recorrido sólo una distancia finita desde la gran explosión. Cuando el universo tenía un año de edad, por ejemplo, la luz podía haber viajado sólo un año (aproximadamente). El universo se halla fragmentado en horizontes que delimitan regiones sin que una pueda ver a otra.

JOÃO MAGUEIJO enseña física teórica en el Colegio Imperial de Londres. Sus intereses oscilan entre el polo observacional y el polo "lunático" (suya es la expresión) de la cosmología, desde el análisis de la radiación del fondo cósmico de microondas hasta los defectos topológicos, quintaesencia y agujeros negros.



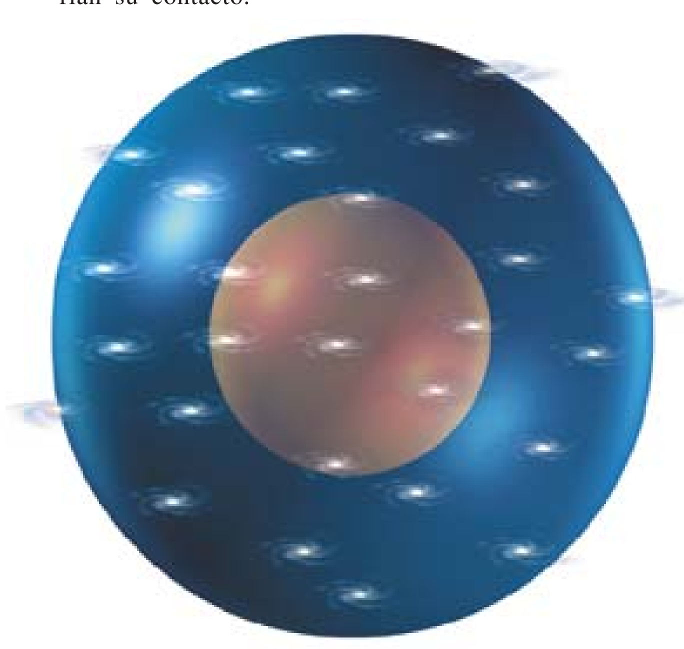
1. INQUIETUD EN EL HORIZONTE

A la tierna edad de un año, el universo estaba subdividido en regiones aisladas, separadas por "horizontes'' de un año-luz en radio (*esferas azules*). Hoy el horizonte tiene un radio de alrededor de 15.000 millones de años-luz (*esfera roja*), por lo que alberga multitudes de estas regiones. Lo raro es que, a pesar de su aislamiento inicial, todas las regiones parecen casi iguales. Explicar esta misteriosa uniformidad constituye el gran éxito de la teoría de la inflación.

La miopía del universo se torna irritante para los cosmólogos. Impide explicaciones físicas —es decir, basadas en interacciones físicas— de la uniformidad del universo primitivo. Dentro del marco de la teoría estándar de la gran explosión, la uniformidad se explica a través del ajuste fino de las condiciones iniciales, un recurso metafísico a la postre.

La teoría de la inflación da un giro astuto al problema. Su idea clave es la siguiente: para una onda de luz en un universo en expansión, la distancia que media desde el punto de partida es mayor que la distancia viajada, por la sencilla razón de que la expansión sigue estirando el espacio ya recorrido. Imaginémonos, en efecto, un conductor que viaja a 60 kilómetros por hora durante una hora; transcurrida ésta, ha cubierto 60 kilómetros, pero si la carretera se hubiera alargado durante ese tiempo, la distancia desde el punto de partida sería mayor que 60 kilómetros. La teoría inflacionaria postula que el universo temprano se expandió con tal celeridad, que el alcance de la luz fue enorme. Verosímilmente regiones separadas podrían haber estado juntas y alcanzado una temperatura y densidad comunes. Cuando la expansión inflacionaria acabó, empezaron a perder contacto.

No se necesita pensar mucho para darse cuenta de que el mismo efecto podría darse si la luz hubiera viajado más deprisa en el universo temprano que lo que hace hoy. Una luz rápida podría haber cosido, en una suerte de centón, retazos de regiones desconectados. Estas regiones se podrían haber homogeneizado. Al decrecer la velocidad de la luz, tales regiones abandonarían su contacto.



2. HORIZONTE ENSANCHADO

La inflación no es la única respuesta al problema del horizonte. Antes bien, pudieron darse condiciones en el universo temprano que permitieran que la luz viajara a una velocidad mayor que la actual: miles de millones de veces más rápido. Una luz vigorosa se encaminó hacia regiones mayores (*esfera azul*). Al frenarse la luz hasta el valor de su velocidad actual, el horizonte se encogió (*esfera roja*). De ahí que ahora sólo podamos ver una parte de las regiones iniciales y no resulte misterioso que el universo parezca tan uniforme.

Esta fue la idea que nos llevó a Andreas Albrecht, a John Barrow y a mí mismo a proponer la teoría de la velocidad de la luz variable (VSL). No íbamos contra los partidarios de la inflación. (Albrecht es uno de los padres de la teoría inflacionaria.) Creímos que los éxitos y los defectos de la inflación se aclararían si existiera un modelo alternativo.

Naturalmente, la teoría VSL requiere repensar los fundamentos y el lenguaje de la física. Lo que significa que admite muchas formas posibles. De entrada cuestionamos la relatividad, aunque con el atenuante de resolver muchos misterios, aparte del de la planitud del universo. Así, nuestra teoría da cuenta del valor minúsculo aunque no nulo de la constante cosmológica del universo en el momento actual. La razón es que la densidad de energía de vacío representada por la constante cosmológica depende estrechamente de c. Una caída adecuada en c reduce a niveles inocuos el valor antaño dominante de la energía de vacío. En las teorías estándar, sin embargo, el valor de la energía de vacío no puede diluirse.

Pero nuestra formulación es sólo una posible. El deseo de reconciliar VSL con la relatividad ha originado una intensa investigación. Las elaboraciones más prudentes de la teoría VSL, promovidas por John Moffat y más tarde por Ian Drummond son más fáciles de aceptar por los relativistas teóricos. Después de todo, se advierte ahora que la constancia de c no es tan imprescindible para la relatividad; la teoría puede basarse en otros postulados. Algunos han apuntado que si el universo es una membrana tridimensional en un espacio de muchas dimensiones, según sugiere la teoría de cuerdas, la velocidad aparente de la luz en nuestro mundo podría variar, mientras persistiría constante la velocidad de la luz, realmente fundamental.

Sólo a través de la experimentación sabremos si la naturaleza decide inflarse o jugar con la velocidad de la luz. La teoría VSL está en este momento mucho menos desarrollada que la de la inflación, así que tiene que hacer predicciones firmes sobre la radiación del fondo de microondas. Por otro lado, algunos experimentos han demostrado que la llamada constante de estructura fina puede no ser constante. La variación de c podría explicar esos hallazgos.

Queda por ver si estas observaciones podrán resistir un nuevo escrutinio; mientras tanto la teoría VSL plantea un desafío teórico considerable. Se distingue de la teoría de la inflación porque afecta a los cimientos de la física. Por ahora, el modelo VSL se halla lejos de la ortodoxia aceptada. Es una incursión en el mundo salvaje.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE VARYING SPEED OF LIGHT AS A SOLUTION TO COSMOLOGICAL PUZZLES. Andreas Albrecht y João Magueijo en *Physical Review D*, vol. 59, n.º 043516; 15 de febrero, 1999.

BIG BANG RIDDLES AND THEIR REVELATIONS. João Magueijo y Kim Baskerville en *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 357. n.º 1763, págs. 3221-3236; 15 de diciembre, 1999.

COVARIANT AND LOCALLY LORENTZ-INVARIANT VARYING SPEED OF LIGHT THEORIES. João Magueijo en *Physical Review D*, vol. 62, n.º 10; 15 de noviembre, 2000.

Shawn Carlson

Una cámara de niebla en una cantimplora

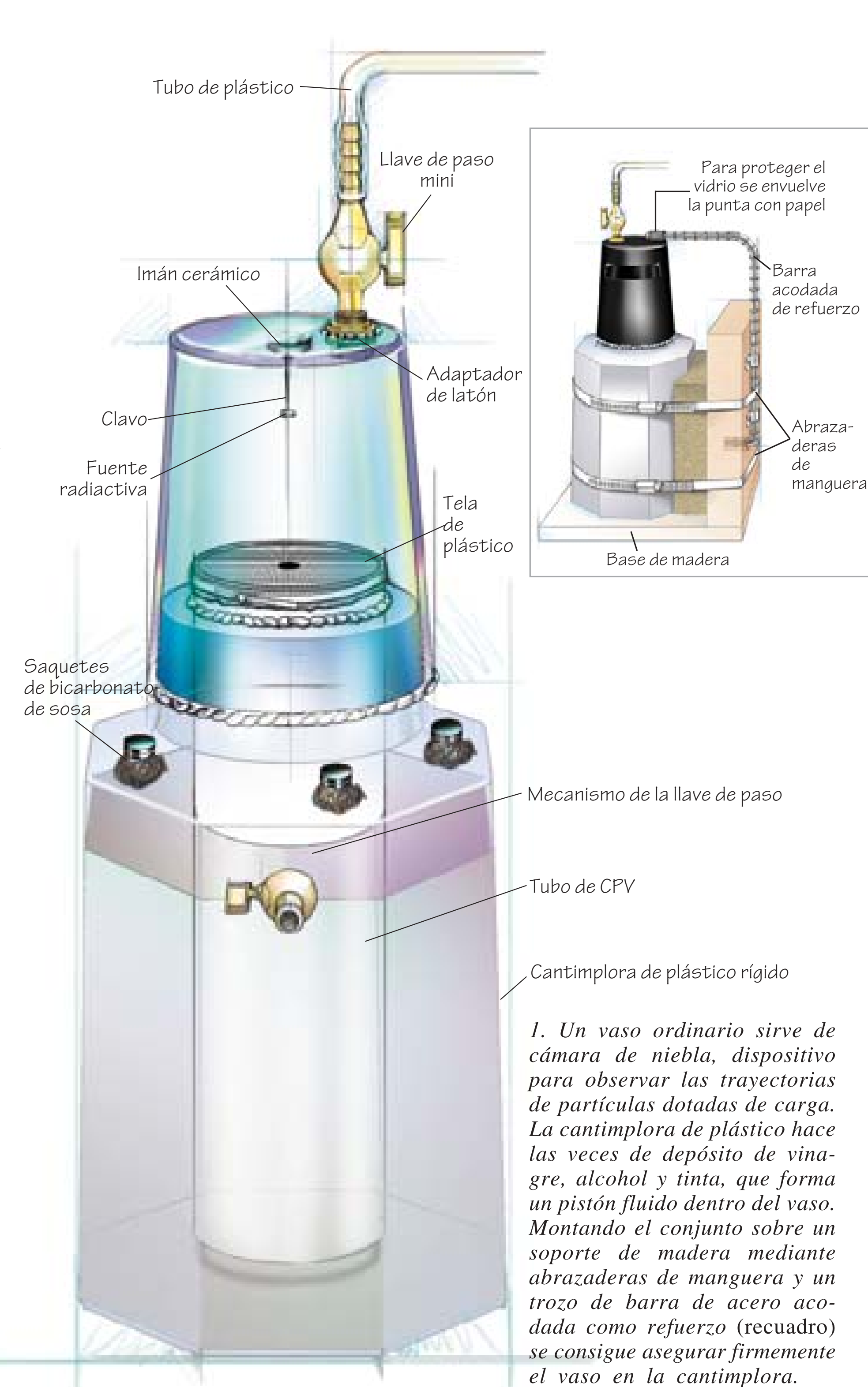
Cuando el aire se enfría, el vapor de agua que contiene acaba condensándose en una nube. Pero el aire puede enfriarse muy por debajo de su punto de condensación normal sin que ésta se produzca. El truco estriba en eliminar las partículas de polvo sobre las que se engendran las gotículas de agua. Entonces el aire enfriado se convierte en "aire sobresaturado".

En 1896 C.T.R. Wilson, físico de Cambridge, descubrió que ciertas partículas dejaban estelas visibles a su paso por el seno de vapores sobresaturados. ¿Por qué? Las partículas convierten algunos átomos neutros del aire en iones cargados, los cuales, al igual que las motas de polvo, inducen la formación de gotículas. Así fue como Wilson pudo construir la primera "cámara de niebla" para poner de manifiesto las trayectorias de las partículas ionizantes.

En mi adolescencia malgasté las horas tratando, y fracasando en el intento, de construir cámaras de niebla según las instrucciones que leía en esta sección de la revista. Luego, ya en mi segundo año de universidad, mi interés revivió al observar la formación de una nube en el cuello de una botella de champán recién descorchada. Al cabo de dos horas había convertido aquella botella en mi primera cámara de niebla operativa.

El "generador" (una cantimplora) se llena de una mezcla de vinagre, alcohol y tinta. Se presuriza la mezcla añadiendo bicarbonato de sosa. El dióxido de carbono desprendido impulsa al líquido coloreado hacia el interior de un vaso de mesa, donde el fluido actúa a modo de pistón comprimiendo el gas del interior. Esa compresión caldea al aire y hace que se sature con vapor procedente del líquido. Al abrir una válvula, el pistón fluido desciende, con lo que disminuyen la presión y la temperatura del aire, lo que a su vez provoca la sobresaturación del aire.

Me valgo de una cantimplora de plástico de un litro de costados planos y boca ancha. Su tapón, levemente cónico, ajusta sin huelgo en cualquier vaso alto. Si el tapón penetrase tanto en el vaso que no que-



1. Un vaso ordinario sirve de cámara de niebla, dispositivo para observar las trayectorias de partículas dotadas de carga. La cantimplora de plástico hace las veces de depósito de vinagre, alcohol y tinta, que forma un pistón fluido dentro del vaso. Montando el conjunto sobre un soporte de madera mediante abrazaderas de manguera y un trozo de barra de acero acodada como refuerzo (recuadro) *se consigue asegurar firmemente el vaso en la cantimplora.*



2. Las mirillas para observar las estelas de las partículas y para ajustar el nivel del líquido se forman colocando cinta adhesiva sobre el vidrio antes de rociarlo con pintura negra

dase espacio para ajustar la cantimplora, habrá que recortar un poco el borde del vaso. Al vidriero que se lo pidamos le rogaremos que, ya puestos, abra un agujero descentrado en la base del vaso para colocar ahí una llave de paso (también podemos hacerlo nosotros mismos). Sorprende que no sea difícil taladrar vidrio. Basta con practicar algunas muescas en el extremo de un trozo de tubo de latón. Este se coloca luego en el portaherramientas de una taladradora eléctrica y se hace girar el extremo enmuescado contra el vidrio, a la vez que se baña la superficie con una pasta de polvo de carborundo del 120 y agua. Aplíquese una presión suave y constante. Conviene emplear una taladradora de banco, pero puede servir una taladradora eléctrica manual. Ante la eventualidad de que el vidrio se haga añicos o el vaso presurizado se rompa, protéjase la vista y úsense guantes. Y podemos aumentar el grado de seguridad cubriendo el vaso con plástico.

Cuando el revestimiento protector se ha secado del todo, se pasa el adaptador de latón roscado por el orificio, se sella cuidadosamente con pegamento de silicona para acuarios, se asegura con una tuerca y una arandela y se coloca la llave de paso. Búsquese además quien suministre imanes cerámicos (el número de catálogo 64-1883 de Radio Shack contiene cinco piezas) y péguese uno de ellos en el centro del fondo del vaso con silicona.

Seguidamente hay que conseguir un trozo de tubo de CPV de un diámetro exterior algo menor que la boca de la cantimplora. En el tapón de ésta se practica un orificio que admita el tubo, y éste debe sobresalir unos dos centímetros por encima del fondo del tapón. El extremo superior del tubo se pega al orificio del tapón. Luego se extiende un trozo de tela de plástico por la boca del tubo. Esa malla reduce las turbulencias en el fluido, con la consiguiente disminución de las turbulencias en el aire contenido en la cámara. La tela de plástico se asegura con una abrazadera de cordón de nailon. En el centro de la malla se abre entonces un agujero. (Abertura que necesitamos como acceso a la cámara.) Finalmente, péguese el tapón al vaso con silicona abundante y colóquese la llave de paso inferior del mismo modo que se colocó la superior.

A unos dos o tres centímetros de la base del vaso se adhieren dos tiras de cinta adhesiva de modo que den casi una vuelta completa. Una tercera cinta se tiende a lo largo de un costado. Luego se rocía el vaso con pintura negra mate al objeto de mejorar el contraste y facilitar la observación de las trayectorias de las partículas. Así se crearán mirillas sin más que retirar la cinta. Para controlar las variaciones del nivel del líquido, se fotocopia una regla y esa escala de papel se pega junto a la mirilla vertical.

Añadir el bicarbonato de sosa al líquido estando todo sellado resulta operación más fácil de lo que parece. Péguese con epoxia un imán cerámico dentro de un saquete hecho con la puntera de una media de nailon. Sugiero empezar añadiendo 2,5 mililitros (una media cucharilla de té) de bicarbonato de sosa al saquete, pero probablemente habrá que ajustar esa cantidad tras algunos tanteos. Póngase el bicarbonato en un trocito de toalla de papel e insértese dentro del saquete ese recipiente improvisado. Sujétese el saquete justo debajo del cuello de la botella mediante dos imanes colocados uno sobre otro en el exterior; al retirar esos imanes exteriores se suelta el bicarbonato sobre la solución. Para poder repetir los experimentos sin abrir la cantimplora, pongo cada vez hasta cinco saquetes en el interior.

Mézclense dos litros de líquido combinando, a partes iguales, vinagre destilado y el alcohol isopropílico más concentrado que pueda encontrarse. Añádanse dos o tres chorritos de tinta; ésta (lo mismo que la pintura negra rociada) facilitará la observación de las estelas; añádanse dos mililitros de sal. Con esta solución se llena la botella del generador hasta aproximadamente un centímetro de los saquetes. Se abre la llave de paso superior y luego se atornilla fuertemente a ella la cámara de niebla. Quizá deban cubrirse las roscas con cinta de teflón o vaselina para hermetizar la unión a la presión. El conjunto se inserta en su soporte. Se abren entonces ambas llaves de paso y se aspira cuidadosamente por el tubo hasta que el líquido llena la cámara de niebla hasta la mitad más o menos; luego se cierran ambas llaves de paso.

Instálese una luz intensa a un lado de la mirilla. Déjese caer un saquete de bicarbonato de sosa y vigílese el nivel del fluido en la cámara de niebla, descargando la presión con la llave de paso inferior cuando la relación de compresión sobrepase más o menos 1,33 (si la relación es menor que 1,25 aproximadamente, no se materializan las trayectorias, y si rebasa 1,38, se forma una nube densa que lo oculta todo). Tras esperar un minuto, se abre presto y por completo la misma llave de paso.

Las estelas de las partículas pueden aparecer sólo durante el breve instante que sigue, por lo que las probabilidades de ver un errabundo rayo cósmico no son en absoluto favorables. Una fuente intensa tanto de partículas alfa (núcleos de helio) como de partículas beta (electrones) brinda un espectáculo mucho más satisfactorio. Las partículas alfa dejan unas estelas cortas, mientras que las partículas beta las dejan más largas.

La fuente de partículas se fija con epoxia a la punta de un clavo de cabeza grande y plana. Este conjunto se hace pasar por el orificio de la tela de plástico hacia la cámara de niebla mediante una pajita de refrescos y la cabeza del clavo se pega al imán situado en el fondo del vaso. Así se consigue asegurar la fuente en su posición hasta que se desee cambiarla por otra.

Aunque de construcción fácil, mi cámara de niebla presenta limitaciones. Las cualidades ópticas de la mayoría de los vasos de mesa son escasas, lo que puede dificultar la observación de las estelas. Además, la recarga de los saquetes de bicarbonato puede hacerse tediosa.

Para este proyecto, la Society for Amateur Scientists ofrece un juego de fuentes alfa y beta. Su precio es de 35 dólares. Pedidos al teléfono 401-823.78.00. Puede escribirse a la sociedad a 5600 Post Road, Suite 114-341, East Greenwich, RI 02818.

Ian Stewart

Puntos y cajas para expertos

Nunca dejan de asombrarme las complejidades matemáticas que entrañan ciertos juegos de apariencia muy sencilla. Tomemos, por ejemplo, un pasatiempo infantil llamado "puntos y cajas". Este juego ha servido de distracción en las escuelas a generaciones de chicos de primaria, pero dudo que ni siquiera una persona en un millón haya llegado a jugarlo de forma óptima. El matemático Elwyn Berlekamp, de la Universidad de California en Berkeley, ha esbozado las abundosas sutilezas del juego en su libro *The Dots-and-Boxes Game*.

Ante todo, recordemos las reglas. El juego comienza con una matriz o plantilla rectangular de puntos dispuestos en filas y columnas equidistantes. Los jugadores van, por turno, conectando puntos contiguos mediante trazos rectos, en sentido horizontal o vertical, pero no en diagonal. Cuando uno de ellos consigue trazar el cuarto lado de una caja —un cuadrado que conecta cuatro puntos adyacentes— tal jugador anota la inicial de su nombre dentro del cuadrado y vuelve a estar de turno (y así, tantas veces seguidas cuantas vaya completando cajas cuadradas). Al terminar la partida, gana el jugador que más veces haya anotado su inicial.

Sean Alfredo y Bea, respectivamente, los jugadores primero y segundo. En la figura 1 podemos ver una partida de muestra desarrollada sobre una plantilla de cuatro por cuatro, en la que los jugadores aplican la estrategia más elemental, la que llamaré de "nivel cero". Alfredo y Bea evitan ir cediendo cajas al otro mientras puedan, mediante jugadas que no creen el tercer lado de una posible caja. El resultado es que la plantilla queda dividida en una serie de "cadenas": regiones serpeantes limitadas por líneas. En cuanto un jugador reclame una de las cajas de la cadena, podrá seguir cerrando cajas, y llegar incluso a tomar la región entera.

En cierto momento del juego, toda la plantilla queda dividida en cadenas de este tipo; la plantilla "está bloqueada". Cuando se alcanza la situación de bloqueo, el jugador de turno suele trazar una línea en la más corta de las cadenas existentes, tratando de conceder a su oponente sólo el mínimo número posible de cajas. (Esta jugada se llama "romper la cadena".) El jugador contrario toma todas estas cajas, y después cede la menor de las cadenas siguientes. En la partida aquí ilustrada, Bea crea un bloqueo en la duodécima jugada. La plantilla está dividida en tres cadenas de dos, tres y cuatro cajas cada una. En la jugada decimotercera, Alfredo le cede a Bea la cadena de dos cajas. Bea, a su vez, le cede a Alfredo la cadena de tres, que se ve obligado ahora a regalarle a Bea la cadena de cuatro cajas. Bea gana la partida, porque cuenta con seis cajas, y Alfredo, sólo con tres.

Dos son los factores que determinan el vencedor en el juego de nivel cero, a saber: primero, si el número de cadenas de la plantilla es par o es non cuando se llegue a la situación de bloqueo, y segundo, cuál es el orden de actuación inmediatamente después del bloqueo. Supongamos que el número de cadenas en el bloqueo es par. En este caso, ganará el jugador que rompa la primera cadena, porque en cada jugada la cadena que este contrincante va a ceder es menor que la que va a recibir en la jugada siguiente. Pero si alcanzado el bloqueo el número de cadenas fuera impar, el jugador que rompa la primera cadena perderá, porque el último movimiento quedará para el adversario. Esa fue la causa de que Bea le ganase a Alfredo en la partida de muestra: el número de cadenas es impar, y Alfredo tiene forzosamente que abrir la primera.

Además, el orden de juego tras el bloqueo depende de que el número de jugadas realizadas hasta ese momento haya sido non o par. Si ha sido necesario un número par de jugadas para llegar al bloqueo, será Alfredo quien haya de romper la primera cadena, y Bea logrará la primera ganancia territorial. Pero si el bloqueo se produce tras una jugada impar, será Bea quien tenga que abrir la primera cadena, y Alfredo logrará la

1. Esta partida típica de "puntos y cajas" llega a una situación crítica en la jugada decimoquinta. Si Alfredo aplica la estrategia básica (flechas azules)*, pierde. En cambio, siguiendo una estrategia más avanzada* (flechas rojas) *gana*



2. Esta plantilla de seis por seis contiene cuatro cadenas y dos dominós

primera ganancia. Así pues, si Alfredo desea ganar, tiene que asegurarse de que el número de jugadas efectuadas antes del bloqueo y el número de cadenas al producirse éste sean ambos pares, o ambos impares. Recíprocamente, si Bea desea ganar, ha de asegurarse de que uno de estos números sea impar y el otro, par. Una cuidadosa consideración de la plantilla cuando faltan unas pocas jugadas para llegar a la situación de bloqueo puede ayudar a conseguir estos objetivos. Llamaré a esta estrategia "juego de nivel uno".

Pero, ¿y si falla la estrategia de nivel uno? Supongamos que, a pesar de todos los esfuerzos de Alfredo para trazar las líneas de la plantilla a conveniencia suya, se encuentra en la misma posición indicada tras la duodécima jugada de la partida de muestra. Pues todavía puede ganar... si adopta una "estrategia de nivel dos". En la jugada decimotercera, rompe la cadena de dos cajas. En la jugada siguiente, Bea reclama el territorio y abre la cadena de tres cajas. Pero en la jugada decimoquinta, Alfredo declina aceptar las tres cajas de esa cadena. Acepta, en cambio, sólo una de ellas y después dibuja la línea del fondo de la plantilla que deja un rectángulo encerrado, al que llamaremos un "dominó".

Esta jugada se conoce por "un doble". Es como un gambito: al sacrificar una de las dos cajas de la cadena de tres, Alfredo sitúa a Bea en una situación fatal. Si Bea trazase una línea a través del dominó en la jugada 16, ganaría las dos cajas. Pero entonces estará obligada a mover otra vez más, y cualquiera que sea su jugada, tendrá que abrir la cadena de cuatro cajas que todavía queda. Alfredo se llevará el lote de un solo golpe, y ganará por cinco cajas propias frente a cuatro de Bea. El resultado es todavía peor para Bea si renuncia a tomar el dominó. Cualquier otra jugada abrirá la cadena de cuatro cajas, y Alfredo no tendrá más que quedarse las cuatro, además de las dos del dominó, ganando la partida por siete contra dos.

La causa de Bea está perdida en el momento en que Alfredo hace su doble, porque sólo queda una cadena en la plantilla. Pero, ¿y si hubiera varias? ¿No podrá Bea recuperar territorio haciendo "dobles" por su parte?

La respuesta es "No siempre". En la figura 2 podemos ver una plantilla de seis por seis donde hay dos dominós y cuatro cadenas. Suponiendo que sea el turno de Bea, podría ella apoderarse de todos los dominós; si no lo hiciera, en su próxima jugada Alfredo podría reclamarlos sin empeorar su posición. Entonces Bea abre la cadena más corta. Dado que el número de cadenas es par, ella cree poder ganar la partida utilizando la estrategia de nivel cero. Pero Alfredo hace una jugada "doble", tomando sólo dos cajas de la cadena de cuatro, y creando un dominó con las otras dos. Esta táctica obliga a Bea a reclamar el dominó y a abrir la cadena de cinco cajas. Alfredo efectúa entonces otra jugada doble, tomando tres de las cajas y dejando para Bea otro dominó. En tanto la cadena contenga cinco cajas o más, la ventaja será para Alfredo.

En este caso es Alfredo quien controla el juego porque puede seguir obligando a Bea a abrir nuevas cajas. Así pues, una buena estrategia para ganar en "puntos y cajas" consiste en hacerse con el control y conservarlo al rehusar siempre las dos últimas cajas de cada cadena. (Excepto, evidentemente, cuando sólo queda una cadena.) Esta es la llamada "estrategia de nivel tres". Ahora bien, ¿cómo lograremos hacernos con el control? Para dicha tarea se requiere la "estrategia de nivel cuatro", que puede ser enunciada como sigue:

- Alfredo trata de conseguir que, al llegar al bloqueo, la suma de los puntos de la plantilla, más el número de cadenas largas (las que contienen tres o más cajas), sea par.
- Bea intenta asegurarse de que tal suma sea impar.

Quizá parezca que estamos entrando en demasiadas honduras. Conste, pues, que hasta el momento hemos llegado solamente a la página 7 del libro de Berlekamp, que tiene 86 páginas de estrategias. El juego de "puntos y cajas" es de tal complicación, que sigue sin conocerse una estrategia completa de victoria.

Acuse de recibo

Sigue llegando una riada de comentarios al artículo sobre paradojas ["Paradojas perdidas", agosto de 2000]. R.B. Burckel, de la Universidad estatal de Kansas, me ha enviado una carta relativa a la paradoja de Richard, cuyo enunciado era: "El mínimo número que no puede ser definido en nuestro idioma con una frase de menos de 20 palabras". Parece que tal número ha de existir: bastaría confeccionar una lista con todas las posibles frases de 19 palabras o menos que definan unívocamente un número, y determinar después el mínimo de los números que no ha sido definido. Ahora, sea cual fuere tal número, ¡el enunciado anterior lo define mediante una frase que sólo contiene 19 palabras!

Burckel hace ver en la paradoja un problema que su creador, el lógico francés Jules Antoine Richard, ya había señalado en 1906: la lista de frases no puede estar bien definida. Consideremos, por ejemplo, estas dos expresiones (he modificado las sugeridas de Burckel; asumo plena responsabilidad del resultado):

"El número nombrado en la expresión siguiente, si en ella es nombrado un número, y cero, si no es así."
"El número nombrado en la expresión anterior, más uno."

Cada frase parece definir por sí sola un solo número, por lo que pertenecen a la lista. Pero tomadas ambas conjuntamente, si la segunda sigue a la primera, son contradictorias. Dado que la lista de frases no puede ser bien definida, la frase de Richard no especifica un único número, y la paradoja desaparece.

Naomi Lubick

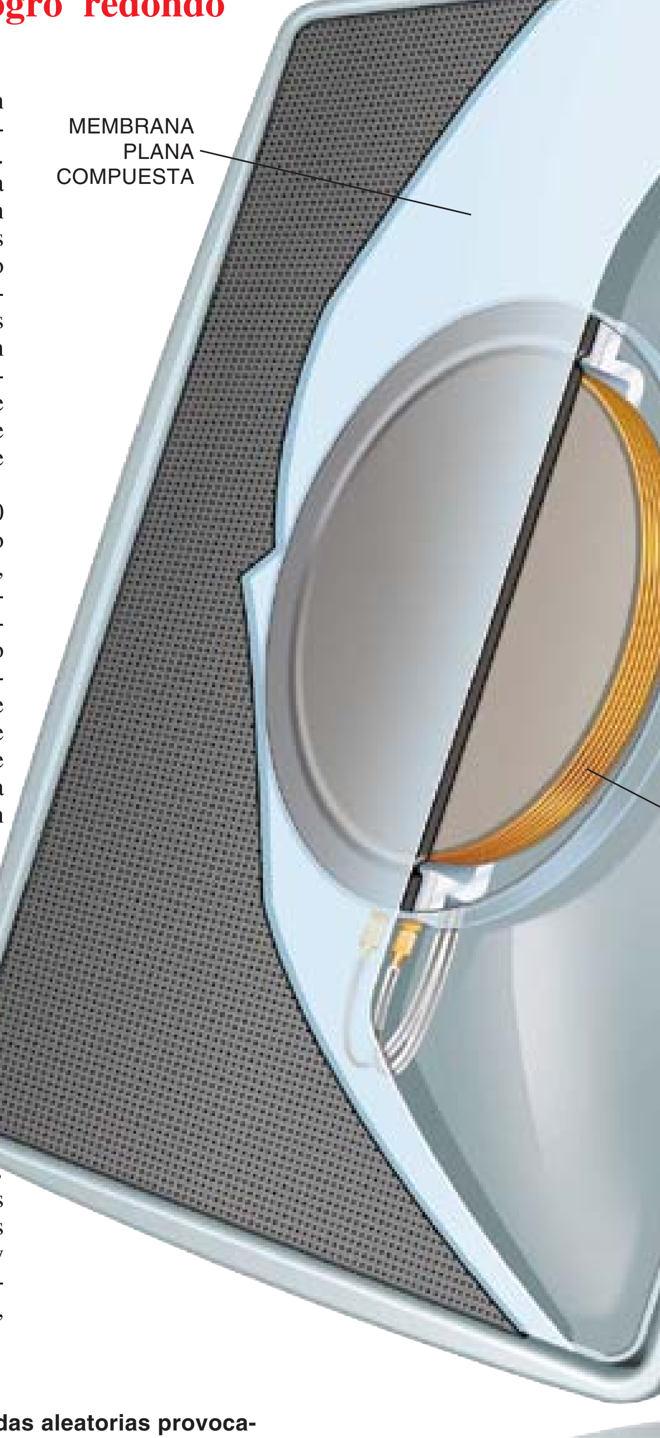
Audiotecnia
Altavoces planos: un logro redondo

En líneas generales los altavoces de membrana plana emplean la misma técnica que sus primos los cónicos, más conocidos. Pero entre ambos media una diferencia fundamental. El éxito de los de membrana plana se basa en el caos y en la interacción de las ondas sonoras. Los altavoces planos amplifican el sonido con membranas de espesor milimétrico. Sus versiones más conocidas se basan en una técnica introducida hace cuatro años por la empresa británica NXT. En un altavoz común, el "excitador", un dispositivo de imán y bobina, transforma impulsos eléctricos en vibraciones diminutas. Desde el punto de unión con ese dispositivo se irradian por toda la membrana oleadas de ondas sonoras de 10 a 15 micras de amplitud, inciden en el borde y retroceden, hasta que entra en vibración toda la superficie de la membrana. Al ser tan pequeñas y parecidas, esas ondas no se interfieren sensiblemente entre sí.

Las ondas sonoras resultantes se emiten uniformemente en 360 grados, con la membrana en el centro. Así, el sonido parece no dirigido, en contraste con el emitido por los altavoces cónicos, que tienden a "focalizar" el sonido hacia un lugar ideal. "El centro de un cono es impulsado más lejos y más rápido que el exterior", expone Olin D. Williford, de Benwin Sound. "Impulsando el aire en diferentes ondas desde el centro hacia la periferia produce unas frecuencias más altas en el centro que en el borde, de modo que se estrecha la dispersión del sonido." Los altavoces de membrana plana distribuyen por igual todas las frecuencias, desde ambas superficies. Para aprovechar la llamada bipolaridad de la membrana plana se sugiere su uso en sistemas de megafonía, con ambas caras emitiendo.

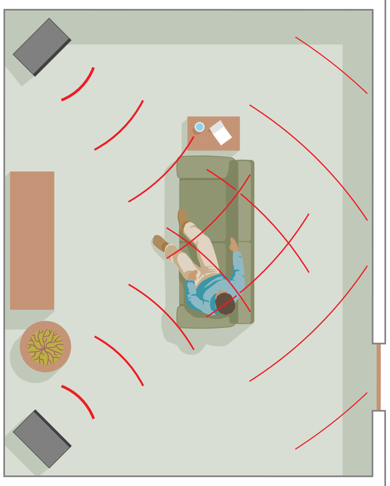
Sin embargo, estos altavoces no reproducen los tonos bajos como lo hacen los equipos tradicionales. En las membranas de superficie plana, las frecuencias más bajas son tan pocas que fácilmente se anulan, y para soportar los tonos graves hay que recurrir a altavoces especiales para graves. Se trabaja en la búsqueda de nuevos materiales capaces de ampliar el margen de sonido hasta los tonos más bajos, a la vez que conserven las pequeñas dimensiones del altavoz. Algunas firmas ensayan otros procedimientos para crear altavoces de membrana plana.

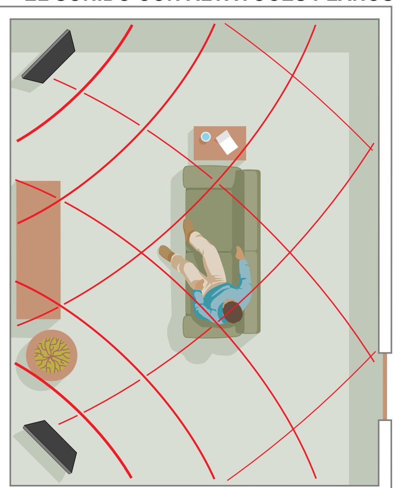
Altavoces de membrana plana pueden encontrarse en guitarras y en teclados. Algunos críticos predicen que como esas membranas consumen menos energía y son más baratas que los otros altavoces, los veremos en cualquier sitio, desde automóviles y teléfonos de bolsillo hasta ordenadores portátiles de pantalla y altavoces planos. Pero el sueño es conseguir un altavoz de membrana plana que replique el sonido de los mejores, y más caros, altavoces de hoy.



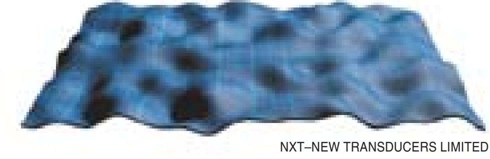
1. LOS ALTAVOCES DE MEMBRANA PLANA vibran con ondas aleatorias provocadas por impulsos magnéticos. Para un altavoz pequeño basta un "excitador", aunque los de mayor tamaño necesitan varios. En los altavoces pequeños, por ejemplo, los empleados en los teléfonos, actúan de excitadores los cristales piezoeléctricos. En los de mayor tamaño se emplea un dispositivo de imán y bobina unido a un punto cuidadosamente elegido, de suerte que se maximice la propagación de diminutas ondas sonoras por toda la membrana.

2. LA DISTRIBUCION DEL SONIDO es más uniforme con los altavoces de membrana plana. Las ondas sonoras emitidas por las membranas cónicas se propagan según haces direccionales porque los bordes centrales y externos de los conos vibran de forma distinta. Las membranas planas emiten un sonido más regular porque las frecuencias se distribuyen igual por toda la superficie.





3. MODELO de propagación por una membrana de ondas sonoras de amplitudes entre 10 y 15 micras.



NXT–NEW TRANSDUCERS LIMITED

EXCITADOR DE IMAN Y BOBINA

SEÑAL DEL AMPLIFICADOR

¿Sabía usted que...?

- La técnica del sistema operativo en modo distribuido de NXT procede de la Agencia Británica de Evaluación e Investigación para la Defensa, cuyos ingenieros trataban de amortiguar el sonido en los aviones militares. Así como los altavoces aumentan las vibraciones, en principio podrían también estimular vibraciones según un patrón que interfiriera y anulara las ondas sonoras procedentes de ruidos de fondo rítmicos indeseados.

- Kwong Quest tiene una base de datos con más de 700 materiales registrados por sus propiedades acústicas. Abarcan desde plásticos hasta espumas duras y una sustancia alveolar de policarbonato. Las láminas de cristal de epoxia dan muy buen sonido, aunque su rendimiento baja con el espesor de la lámina. Una lámina de 1,80 × 1,80 m y un grueso de unos ocho milímetros produce un buen sonido, pero suele preferirse un material espumoso de tipo aerospacial.

- Los altavoces electrostáticos avanzados poseen unas membranas vibratorias planas suspendidas entre dos placas perforadas que crean cargas eléctricas de atracción y repulsión, haciendo que toda la membrana vibre a la vez. Estos altavoces, que generalmente tienen la altura de una persona, parecen armatostes monstruosos al lado de los electrodinámicos planos, pero emiten un sonido más nítido.

NEXOS

James Burke

Funciones educativas

El otro día, me disponía a enviar una carta cuando recordé que Sir Rowland Hill descubrió la corrupción generalizada en el servicio postal británico (abusos del privilegio del franqueo gratuito por parte de algunos miembros del Parlamento; sin el menor rubor, remitían por esa vía exenta un piano, una vaca o dos sirvientas). Zanjó el problema en 1840 con el primer sello postal adhesivo de pago anticipado del mundo, el Negro de penique. Tres años después, Brasil copiaba la medida y luego ya todos.

Hill empezó como maestro de escuela. En 1819 inauguró la radical y novedosa escuela Hazelwood en Birmingham. El colegio tenía calefacción central (¡en Inglaterra!), un gimnasio, una piscina, lenguas modernas impartidas según un método directo y un laboratorio para algo nuevo y raro llamado clases de ciencia. Hill adquirió probablemente su talento pedagógico mientras trabajaba para su padre, Thomas, quien en 1808 abrió una escuela para ganar algo de dinero tras la quiebra de sus telares. Para ganar un poco *más* de dinero (debía mantener a mujer y cuatro hijos), impartió, también, lecciones privadas de matemáticas. Debió de ser buen profesor, porque uno de sus pupilos, Edwin Guest, devino una celebridad en matemáticas en el Colegio Caius de Cambridge y, finalmente, en 1852, catedrático y reclamo de la universidad. Sin embargo, durante la mayor parte de su vida Guest estuvo más interesado en antigüedades que en la aritmética. Primero fue el inglés antiguo (de entre sus muchas obras lingüísticas imposibles de encontrar: “Etimología de la Palabra ‘Stonehenge’”) y luego los estudios romano-británicos (cuyas bases cimentó).

En 1824, Guest inició un viaje al continente para realizar la clásica gira de autosuperación postuniversitaria propia de las clases altas. Pasó un año en Weimar y entregó una copia de la reciente traducción de *Fausto* realizada por Percy Bysshe Shelley a un sorprendido autor (nadie le había comunicado semejante proyecto), el decano de la cultura alemana: Johann W. von Goethe. Asumiendo que cualquier cosa que diga de Goethe no evitará que *alguien* se irrite, lo dejaremos en: aventuras amorosas cada cuarto de hora, 14 volúmenes de ciencia (geología, zoología, botánica, minería y óptica), toneladas de poemas, obras de teatro, novelas, óperas, himnos y filosofía. Una aportación tal que le valió el reconocimiento del propio Napoleón.

Una de las ideas a las que con mayor ahínco se entregó Goethe fue la de *Ur*, su concepto de los arquetipos ideales de todo, morfoseados (él inventó la morfología y su nombre) en las distintas formas de vida que hoy se contemplan. Arquetipos como la columna vertebral de los vertebrados; por cierto, consideraba el cráneo una mera extensión de la columna.

También se ocupó de ello Lorenz Oken (y ya tenemos otro problema de primacía, tan frecuente en ciencia), un tipo de altos vuelos por aquel entonces, pero caído tan en desgracia que ya no merece ni una entrada en la *Enciclopedia Británica*. A pesar de ello, está vivo y goza de buena salud, al menos de espíritu, en cualquier reunión científica, porque suya fue la idea de tales congregaciones. Oken fue otro buscador de *Ur*. En su caso, el *Ur* genuino sería una arcilla primitiva, en riberas muy antiguas, de la que nació toda la vida, mediante generación de animales microscópicos. La arcilla primigenia cuadraba acertadamente con las inclinaciones de Oken en filosofía natural: la escuela de pensamiento romántica que creía un sustrato común unificador de la humanidad y la naturaleza. (¿Y por qué no? Tal vez fuera la arcilla.)

Poco después de graduarse en 1804, Oken enseñó en la Universidad de Jena, hacía poco abandonada por los llamados románticos de Jena, cuyo aroma aún se respiraba. Fue líder del grupo Ludwig Tieck, autor de demasiadas obras dignas de mención, excepto una que el lector tal vez conozca: *El gato con botas*. Tieck también era un entusiasta de Shakespeare, lo que le llevó a recrear teatros isabelinos y a asesorar a August von Schlegel (también del grupo de Jena) en su traducción del bardo.

Y aquí me gustaría hacer un alto. Se supone escrito en piedra que el romanticismo empezó con los alemanes. Reivindico su origen en un tipo al que Schlegel *et al.* se dedicaron con pasión: un escritor inglés de mediados del siglo XVIII que nadie recuerda, de nombre Edward Young (imagino que el autor favorito del lector). Fue uno de esos que recibieron el apropiado nombre de poeta de cementerio porque entre lápidas pasaba su tiempo melancólico, proclamando banalidades sobre la naturaleza transitoria de las cosas.

No debe sorprender que la divertida obra magna de Young fueran 10.000 versos libres con el animado título de *Pensamientos nocturnos sobre la vida, la muerte y la inmortalidad*. Ho-



jéelo quien resista. Junto con otra obra, *Conjeturas sobre la composición original*, los excesos de Young abocaron a los literatos alemanes al delirio. Y ayudaron a poner los cimientos de lo que se conocería como Sturm und Drang, "la tormenta y el afán", frenesí que anticipó el romanticismo. Y que alimentó la especie de que los británicos eran unos degenerados.

De regreso, Young recibió finalmente el reconocimiento oficial que merecía, cuando en 1761 fue nombrado mayordomo de vestuario de la viuda princesa Augusta (la que ayudó a convertir Kew en los reales jardines botánicos). El puesto que ocupara Young había quedado vacante, por decirlo de alguna manera, tras el oportuno fallecimiento de quien antes lo desempeñaba: el vicario anglicano Stephen Hales, de quien he hablado en otras ocasiones, un administrador de la colonia de Georgia. La fisiología vegetal ("¿Por qué asciende la savia?") era uno de sus fuertes. También lo eran otros experimentos que no describiré, pero sí apuntaré que se refieren a cortar la cabeza de una rana y observar que el cuerpo aún se mueve durante unos minutos, abriendo así la visceral controversia: "¿reside el alma en la médula espinal?". No podemos tampoco olvidar que Hales inventó un ventilador para eliminar el aire fétido de prisiones, hospitales, barcos y otros lugares cerrados. Su aparato de aire lo probó en 1751 en el mercante *Conde de Halifax* el hidrógrafo, agrimensor y minerólogo Henry Ellis, que acababa de volver, como observador científico, de una de tantas exploraciones en busca del paso del Noroeste que terminaron en la bahía de Hudson.

Su patrón, George Montagu Dunk, conde de Halifax, lo consideró tan experto en cuestiones transatlánticas que lo nombró gobernador de Georgia, luego de Nueva Escocia y por último su asesor en asuntos americanos. Que se tornaron candentes en 1770, al llegar Dunk a lord del Sello Privado en el gobierno de su sobrino, lord North. La reconciliación con los colonos era un trago demasiado amargo para North (especialmente después de lo de Boston en 1773), y las cosas aún empeoraron cuando North subestimó la voluntad de los colonos de resistir (y de los franceses de ayudarles). Que es lo que hizo prácticamente todo el mundo.

Todo el mundo menos el parlamentario reformista lord Shelburne, que se movió con insistencia a favor de los rebeldes americanos con la ayuda de notas de investigación proporcionadas por su bibliotecario y compañero de viaje. La persona en cuestión estaba tan a favor de la revolución (americana y francesa) que tuvo que ausentarse de la ciudad (y del país) cuando una horda patriótica redujo a cenizas su casa, su laboratorio y sus escritos. Afortunadamente, antes había tenido tiempo de ser codescubridor del oxígeno, inventor de la gaseosa y científico arrogante. Joseph Priestley (porque de él se trata) comenzó como preste sin parroquia y en 1780 enseñó catecismo en Birmingham.

En esa escuela daba clases el padre de Rowland Hill.

Neuronas

Y sinapsis

CAJAL, por José María López Piñero. Editorial Debate; Madrid, 2000. **SANTIAGO RAMÓN Y CAJAL. TEXTURE OF THE NERVOUS SYSTEM OF MAN AND THE VERTEBRATES.** Traducido al inglés por Pedro Pasik y Tauba Pasik. Springer Verlag; Viena, 1999.

BIOPHYSICS, por Roland Glaser. Springer Verlag; Heidelberg, 2001. **THE SQUID GIANT SYNAPSE. A MODEL FOR CHEMICAL TRANSMISSION,** por Rodolfo R. Llinás. Oxford University Press; Oxford, 1999. **BIOPHYSICS OF COMPUTATION: INFORMATION PROCESSING IN SINGLE NEURONS,** por Christof Koch. Oxford University Press; Oxford, 1999.

THE HANDBOOK OF COGNITIVE NEUROPSYCHOLOGY. WHAT DEFICITS REVEAL ABOUT THE HUMAN MIND. Dirigido por Brenda Rapp. Taylor and Francis; Philadelphia, 2001. **EVOLUTION AND THE HUMAN MIND. MODULARITY, LANGUAGE AND META-COGNITION.** Dirigido por Peter Carruthers y Andrew Chamberlain. Cambridge University Press; Cambridge, 2000.

René Descartes se inspiró en las fontanas y juegos de agua de Versailles, lo último en mecánica del siglo XVII, para describir el cerebro en su *Traité de l'homme*. Más reciente, en el alba de las comunicaciones, el cerebro se comparó a una centralita telefónica. Hoy, la metáfora favorita es el computador digital, con una circuitería nerviosa antaño reputada irremplazable. Sabemos ahora que en el bulbo olfativo y el hipocampo de mamíferos adultos se producen fenómenos de neurogénesis.

Pero nos hallamos muy lejos de hacer realidad un sueño inveterado, el de poder asociar la microestructura de las regiones de la corteza a una función determinada. Lo avanzado, y quizá lo por venir, se apoya en la teoría de la neurona, el genial descubrimiento de Santiago Ramón y Cajal. A tal señor tal honor debe decirse, sin hipérbole, del *Cajal* escrito por José María López Piñero. Alejado de ditirambos y elegías, esta obra de madurez saca a plena luz uno de los momentos más obscuros y enmarañados, más creadores también, de la historia de la ciencia, en el que se cruzan métodos inseguros, conceptos borrosos e intuiciones de larguísimo alcance.

Cursa la carrera en la "Escuela libre" de Medicina de Zaragoza, al tiempo que se ejercita en la disección, colaborando con su progenitor en el Hospital de Nuestra Señora de Gracia. Gana por oposición el puesto de "ayudante disector", que implicaba ocuparse de la ejecución de las preparaciones anatómicas. Cuando en abril de 1874 se recrudece el levantamiento independentista de Cuba, es llamado a filas y marcha a la isla como médico militar. Regresó, enfermo, en junio del año siguiente.

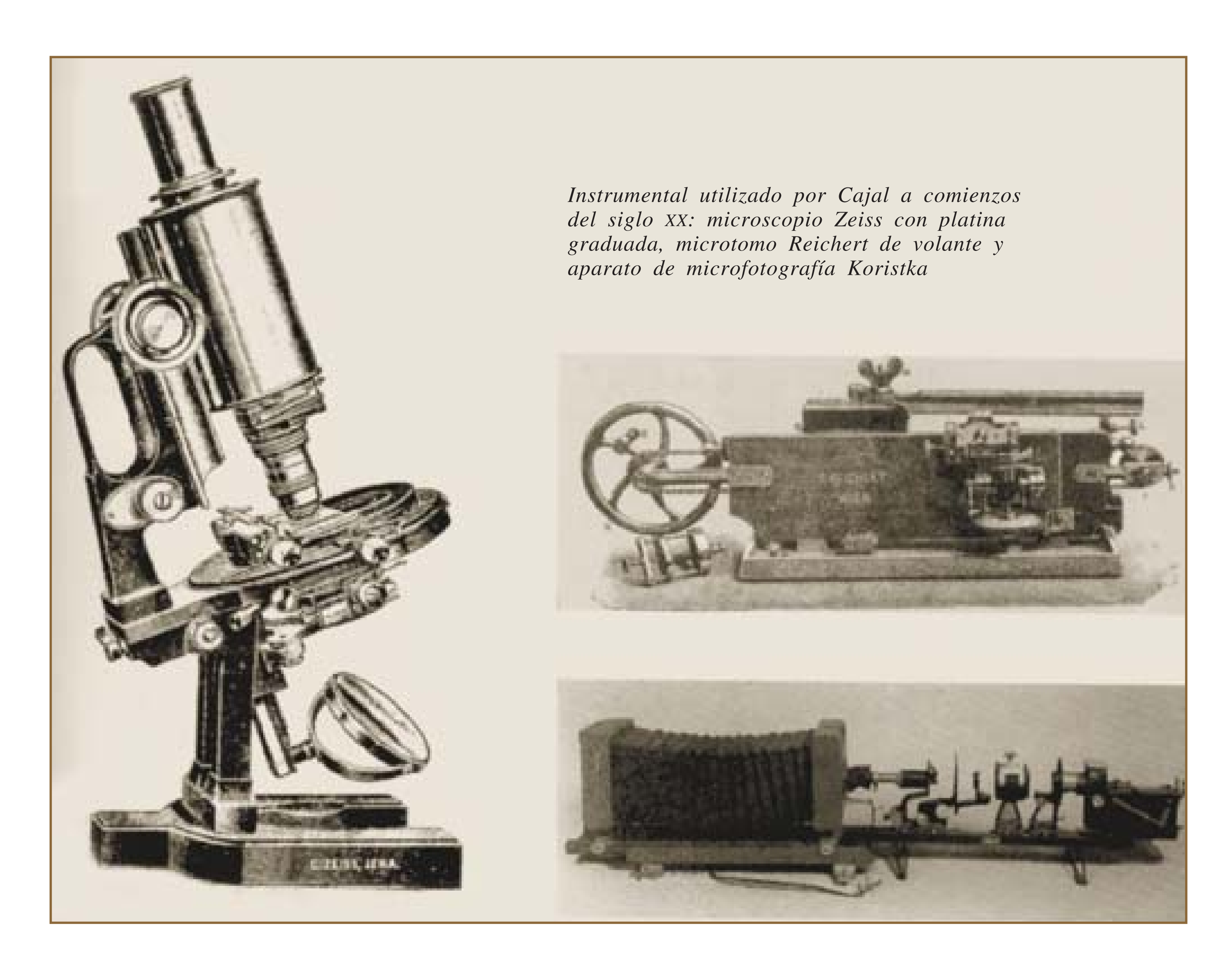
Al erigirse en facultad la escuela médica zaragozana, en 1877, es designado profesor auxiliar interino. Para proseguir la carrera académica debe obtener el doctorado en la Universidad de Madrid. Era materia obligatoria del mismo la histología normal y patológica, que enseñaba Aureliano Maestre de San Juan. En su laboratorio histológico vio las primeras preparaciones micrográficas. Maestre apadrinó su tesis de grado sobre la *Patogenia de la inflamación*, una exposición escolar y juicio crítico de las teorías propuestas con particular detenimiento en la citopatología de Virchow. Entre 1878 y 1883 ahondó en embriología y en anatomía comparada, desde el enfoque evolucionista que les imprimen Ernst Haeckel y Huxley. Disciplina su preparación histológica en los textos de Louis Antoine Ranvier, maestro de Luis Simarro, cuyo estudio acompasa con una soltura creciente en las técnicas micrográficas, la fotografía y el dibujo. Se asoma a la litografía para ilustrar sus dos primeros trabajos, que fueron repeticiones de experimentos ajenos.

A finales de 1883 gana la cátedra de anatomía descriptiva y embriología de la Universidad de Valencia, donde dominaba la "nueva medicina de laboratorio", experimental y alejada de neohipocratismos redivivos. Según lo acostumbrado, Cajal envía a la imprenta su *Manual de histología normal y de técnica micrográfica*, pero no es un refrito al uso, sino un articulado repaso de la materia con observaciones propias. Estas últimas van cobrando importancia y autonomía crecientes. Impresas en *La Crónica Médica* y el *Boletín del Instituto Médico Valenciano*, aparecerán luego algunas de ellas, traducidas al francés, en la *Internationale Monatschrift für Anatomie und Histologie* de Wilhelm Krause. Con un microscopio Zeiss regalado y los escritos de Flemming y Strasburger penetra en la división celular.

En 1887 Cajal visita, en Madrid, el laboratorio histológico de Simarro, encuentro que resultó determinante para su consagración a la investigación histológica del sistema nervioso. Simarro, de exquisita formación francesa, le descubrió a Camillo Golgi: el método de impregnación cromoargéntica para teñir las células nerviosas y el tratado *Sulla fina anatomia degli organi centrali del sistema nervoso*.

Trasladado a Barcelona, trabaja con el método de la "reazione nera", que modificó con el "proceder de doble impregnación": sometía los cortes, una vez extraídos de la solución de nitrato de plata, a un nuevo baño bicrómico y a otra impregnación argéntica. Desde decenios antes, las observaciones de Albert von Kölliker (principal valedor de Cajal andando el tiempo) parecían abonar la tesis del carácter independiente de las neuronas. En el polo opuesto militaba Joseph Gerlach, quien en 1871 postuló que la sustancia gris de los centros nerviosos era una red integrada por la fusión de las dendritas.

La actividad científica de Cajal durante 1888 y 1889 fue tan intensa, que para dar a conocer sus trabajos fundó la *Revista Trimestral de Histología Normal y Patológica*. En esos meses de sorprendente creatividad pergeñó su "nueva verdad" sobre la morfología y las conexiones de las células nerviosas en la sustancia gris, resumida en cuatro puntos o leyes de universal validez neurológica: 1) Las ramificaciones colaterales y terminales de todo cilindroeje acaban en la sustancia gris, no mediante una red difusa, según defendían Gerlach y Golgi con la mayoría de



Instrumental utilizado por Cajal a comienzos del siglo XX: microscopio Zeiss con platina graduada, microtomo Reichert de volante y aparato de microfotografía Koristka

los neurólogos, sino mediante arborizaciones libres, dispuestas en variedades de formas (cestas o nidos pericelulares, ramas trepadoras, etc.) 2) Estas ramificaciones se aplican íntimamente al cuerpo y dendritas de las células nerviosas, estableciéndose un contacto o articulación entre el protoplasma receptor y los últimos ramúsculos axónicos. De las referidas leyes anatómicas despréndese dos corolarios fisiológicos: 3) Puesto que el cuerpo y dendritas de las neuronas se aplican estrechamente a las últimas raicillas de los cilindroejes, es preciso admitir que el soma y las expansiones protoplasmáticas participan en la cadena de conducción, es decir, que reciben y propagan el impulso nervioso, contrariamente a la opinión de Golgi, para quien dichos segmentos celulares desempeñarían un papel puramente nutritivo. 4) Excluida la continuidad sustancial entre célula y célula, se impone la opinión de que el impulso nervioso se transmite por contacto, como en las articulaciones de los conductores eléctricos, o por una suerte de inducción, como en los carretes de igual nombre.

En 1890 demostró que la estructura de las vías olfatorias se ajustaba a la teoría de la neurona. Con un planteamiento filo-ontogenético, acometió el desarrollo embrionario de las células y las fibras nerviosas de la médula espinal y el cerebelo, confirmando el punto de vista de Kölliker y His, según el cual el "neuroblasto o célula nerviosa primitiva genera en los nervios, mediante la emisión de un brote o apéndice, el axón, que crecería libremente al través de los demás tejidos para abordar los aparatos terminales, donde acabaría mediante ramificaciones embrionarias". Durante 1891 y principios de 1892 continuó sus observaciones sobre la retina, el cerebelo y los ganglios linfáticos. Y formuló la ley de la polarización dinámica, o de la dirección del impulso nervioso: "La transmisión del movimiento nervioso tiene lugar desde las ramas protoplásmicas hasta el cuerpo celular, y de éste a la expansión nerviosa. El soma y las dendritas representan, pues, un aparato de recepción, mientras que el axón constituye el órgano de emisión y repartición". Matizada más tarde cuando admitió que la conducción de los impulsos nerviosos cursa a veces desde las dendritas hacia el axón.

Corona su carrera académica en la Universidad de Madrid, a la que se incorpora en 1892. Tras unos años en que corrobora la validez de la teoría de la neurona y la ley de la polarización dinámica en numerosos territorios del sistema nervioso, en 1897 inicia la publicación de la *Revista Trimestral Micrográfica*, órgano oficial de sus trabajos y los de sus colaboradores. Comienza también en 1897 la *Textura del sistema nervioso del hombre y de los vertebrados*.

Desgrana la *Textura*, "mi obra magna", en fascículos. El primero, *Elementos del tejido nervioso*, fue impreso en diciembre de 1897; el segundo, *Médula espinal, ganglios raquídeos, terminaciones nerviosas y consideraciones fisiológicas sobre la marcha de las corrientes en la médula*, en 1898; el tercero, *Histología comparada de la*

médula y del desarrollo del sistema nervioso, en julio de 1899; el cuarto, *Estructura del bulbo raquídeo y origen de los nervios craneales*, en diciembre del 1900; el quinto, *Vías y focos intrínsecos del bulbo, estructura de la protuberancia, el cerebelo y los ganglios cerebelosos e histogénesis cerebelosa*, en diciembre de 1901; el sexto, *Estructura del cerebro medio, la retina y los focos talámicos geniculado externo, sensitivos, semilunares o accesorios de éste, angular y dorsal*, en diciembre de 1902; y el séptimo, *Resto del tálamo, cuerpo estriado, cerebro y gran simpático*, en febrero de 1904.

Cinco años después comenzó a publicarse la edición francesa con la traducción de Léon Azoulay. Tras una primera versión al inglés, muy desafortunada, se nos ofrece *Santiago Ramón y Cajal. Texture of the Nervous System of Man and the Vertebrates*, cuya presentación cae en tópicos extemporáneos. Salvo algunos párrafos esclarecedores de Sotelo, el lector puede saltarse esas páginas y volver a López Piñero. Consulte, eso sí, las anotaciones apostilladas a cada capítulo, realizadas por Pedro y Tauba Pasik, traductores y encargados de introducir las oportunas correcciones.

Sobre el pilar de la teoría cajaliana (neurona, principio de especificidad de la conexión y principio de polarización dinámica) se asienta la ciencia celular moderna del sistema nervioso. El otro punto de apoyo es la hipótesis iónica. Charles Sherrington llamó sinapsis al lugar donde los procesos neuronales entran en contacto y se comunican con otra neurona (*Biophysics*; *The Squid Giant Synapse. A Model for Chemical Transmission*; *Biophysics of Computation: Information Processing in Single Neurons*).

En la mayoría de las sinapsis existe un hiato de unos 20 nm (la hendidura sináptica) entre la célula presináptica y la postsináptica. En los años treinta, Otto Loewi, Henry Dale y Wilhelm Feldberg establecieron —en las sinapsis neuromusculares y autónomas— que la señal que tiende un puente sobre la hendidura suele ser una pequeña molécula, un neurotransmisor, que se descarga del terminal presináptico, se difunde a través del intervalo y se une por fin a los receptores que presenta la célula diana postsinática. A tenor del receptor específico, la célula postsináptica se excitará o se inhibirá. Se tardó algún tiempo en establecer que la transmisión química ocurría también en el sistema nervioso central.

A comienzos del siglo XX se reconoció que las células nerviosas tenían un potencial iónico, el potencial de membrana en reposo (detalladamente expuesto en el libro de Roland Glaser). Se supo también que el impulso cursaba a lo largo del axón mediante una señal eléctrica, el potencial de acción, del que se creía que anulaba el potencial de reposo. En 1937 Alan Hodgkin descubrió que el potencial de acción generaba un flujo de corriente local sobre su extremo de avance, corriente que despolarizaba la región adyacente de la membrana axónica. Dos años después, Hodgkin y Andrew Huxley observaban que el potencial de acción no anulaba, sino que invertía el potencial de reposo. Hodgkin, Huxley y Bernard Katz asociaron, más tarde, el potencial de acción al movimiento de iones específicos (K^+, Na^+ y Cl^-) a través de poros (canales iónicos) de la membrana axónica. La hipótesis iónica colocaba al sistema nervioso en el marco fisicoquímico común de toda la biología celular.

Katz, Paul Fatt y John Eccles demostrarían que los canales iónicos eran también fundamentales para la transmisión de las señales a través de la sinapsis. Sin embargo, en vez de venir regulados por el voltaje, como los canales de sodio y potasio de los potenciales de acción, los canales excitadores sinápticos se hallaban sometidos al control químico de los ligandos.

Teoría estelar

An Introduction to the Theory of Stellar Structure and Evolution, por Dina Prialnik. Cambridge University Press; Cambridge, 2000.

Uno de los ámbitos de la astrofísica donde posiblemente los conocimientos sean más extensos y detallados es el de la evolución estelar. *An Introduction to the Theory of Stellar Structure and Evolution* sigue una estructura didáctica con una clara trayectoria de sus contenidos desde los observables y primeros principios hacia temas que requieren una mayor elaboración y complejidad. Parte, por consiguiente, de la información que nos proporcionan las observaciones actuales, sigue con los principios básicos de la física que gobierna los fenómenos que tienen lugar en el interior de las estrellas, continúa con las reacciones nucleares y termina planteando modelos simples y analizando extensamente la estabilidad y evolución de las estrellas desde su formación hasta sus estadios finales, a veces notoriamente conocidos, como en el caso de las supernovas, las estrellas de neutrones o los agujeros negros. Si algunas carencias puede tener es no incluir las oscilaciones estelares, la rotación de las estrellas o la influencia de los sistemas binarios compactos en el marco de la evolución estelar, puesto que la posible transferencia de masa entre las componentes de un sistema binario compacto afecta a la evolución de ambas estrellas. Es, sin embargo, cierto que un tratamiento adecuado de dichos fenómenos puede requerir de un espacio excesivo y estar fuera de alcance de un texto introductorio.

La autora tiene una dilatada experiencia en el campo de la física de los cometas y de las "novas" y, lo que es más interesante, posee una probada experiencia docente, en el ámbito universitario, que se halla sin duda reflejada en su obra. Este es un libro de nivel universitario, útil para estudiantes de los últimos cursos de astrofísica o para aquellos profesionales de otros campos de la física que busquen un texto que proporcione una buena introducción a la formación y evolución de las estrellas. Es, en mi opinión, un libro muy didáctico, con gráficas y figuras en cantidad suficiente. La bibliografía, al nivel de artículos es extensa y muy clásica. Si bien ello se traduce en proporcionar conocimientos consolidados, implica una falta de problemas abiertos que puedan proporcionar un estímulo al estudiante, así como una semilla a partir de la cual profundizar en la búsqueda bibliográfica. Sin embargo posee, a mi entender, dos características muy positivas que desafortunadamente no son todo lo corrientes que debieran ser en libros de estas características, y que les proporcionan un valor añadido: propone ejercicios para todos los capítulos, que resuelve en uno de los apéndices, y proporciona notas históricas, en distintos lugares del texto, muy instructivas y refrescantes.

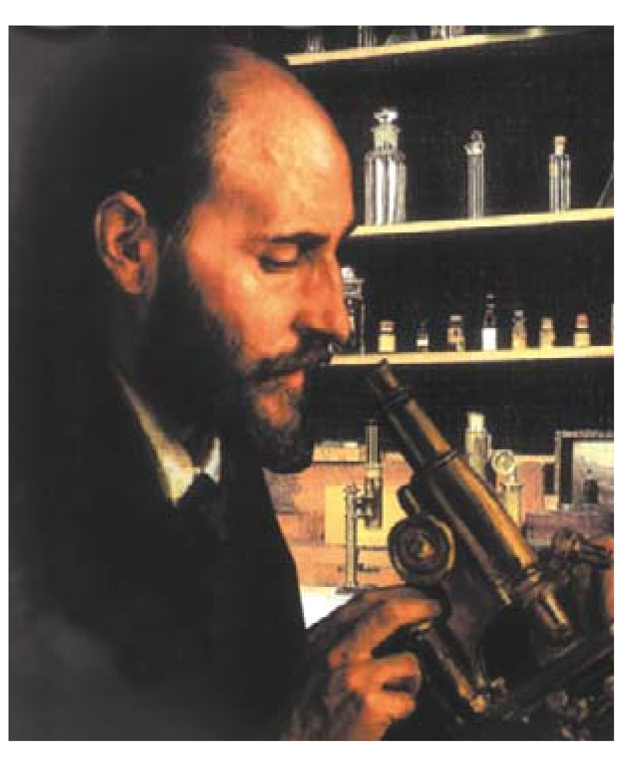
—JORDI CEPA

Vino primero el neurotransmisor acetilcolina. Luego, en los años sesenta y setenta, se fueron agregando glutamato, GABA, glicina, serotonina, dopamina y norepinefrina. Se conoce ya un centenar de transmisores químicos, incluidos los últimos llegados, el óxido nítrico y el monóxido de carbono.

No tardó en hallarse que algunas sinapsis liberaban un péptido cotransmisor, capaz de modificar la acción de los transmisores clásicos. Hubo más. La transmisión entre neuronas era, a veces, de carácter eléctrico. Las sinapsis eléctricas tienen unas hendiduras sinápticas menores; en ellas, el tendido de puentes se realiza mediante uniones de intervalo. A finales de los años sesenta comenzó también a disponerse de información sobre la estructura biofísica y bioquímica de los poros iónicos, sus mecanismos de apertura y cierre. Su selectividad, que depende de las interacciones físico-químicas entre canal e ion. Esa trayectoria culminó con el desarrollo del método del pinzamiento de membrana, por Erwin Neher y Bert Sakmann, que permitió la medición del flujo de corriente a través de un canal iónico.

Los avances principales se dieron en el estudio de la sinapsis en el calamar gigante, resumidos con claridad y hondura por Rodolfo R. Llinás. Recuerda éste que las sinapsis eléctricas son las más directas. Se forman los canales intercelulares por el encuentro de seis subunidades transmembranales que definen un hemicanal dentro de la membrana plasmática presináptica. La disposición hexagonal de subunidades transcelulares que se configura, aporta una vía de baja impedancia para el rápido movimiento de la corriente iónica, así como para que emigren moléculas de bajo peso molecular de una célula a otra.

La sinapsis prototípica de neuronas de vertebrados está formada entre un terminal axónico presináptico y una dendrita postsináptica, y se denomina sinapsis axodendrítica. En los vertebrados encontramos un amplio repertorio de combinaciones simples y complejas de asociaciones sinápticas (axodendríticas, somadendríticas, dendrodendríticas, somasomáticas, dendrosomáticas, mixtas, recíprocas y en serie).



Santiago Ramón y Cajal

Las neuronas de los invertebrados carecen a menudo de ramificaciones dendríticas procedentes del soma celular; en esos casos los contactos sinápticos se producen directamente entre un axón presináptico y un axón postsináptico. El sistema neuronal gigante del calamar consta de tres conjuntos de neuronas. Los dos primeros juegos se alojan en el cerebro y, el tercero, en la pared rostrodorsal del manto, cerca de la línea media. La contractilidad del manto va de un movimiento sutil, cuando mueve el agua sobre las branquias para su oxigenación, a uno muy fuerte, cuando genera un movimiento rápido (mediante propulsión de agua en chorro) durante el comportamiento de defensa o ataque. Esta segunda contracción síncrona del manto viene activada por el sistema neuronal gigante.

A menudo la investigación en redes neurales se construye sobre la ficción de que las neuronas son unidades umbrales simples, dejando de lado la naturaleza compleja y dinámica de las sinapsis, dendritas y corrientes iónicas. Christof Koch sale al paso de ese reto. Se propone sacar a la luz la forma en que las neuronas multiplican, integran o demoran la información sináptica, sin olvidar el modo en que la información puede cifrarse en la diferencia de potencial a través de la membrana, en la concentración de calcio intracelular o en la temporización de espigas individuales.

Concilia la biofísica con la computación y el procesamiento de la información. ¿Podemos ofrecer una explicación de la sinapsis en términos de un aparato de conmutación estocástico, no recíproco, que transmite una señal binaria entre dos neuronas? Que el cerebro computa es un truismo para Koch. Cualquier cerebro toma los datos sensoriales recibidos, los cifra en diversas variables biofísicas (por ejemplo, potencial de membrana o tasas de disparo de las neuronas) y acomete luego un vasto número de operaciones pobremente conocidas. El resultado de algunos de esos cálculos puede almacenarse para su ulterior aprovechamiento. Le interesa el tipo de procesamiento de la información que subyace bajo la percepción y el control motor, un fenómeno que acontece en una escala temporal de milisegundos a fracción de segundos.

Cualquier proceso físico que transforme variables puede considerarse computación en tanto en cuanto pueda representarse en una o varias operaciones matemáticas que realizan una función útil. Las sinapsis inhibidoras y excitadoras en un árbol dendrítico pueden representarse mediante una operación polinómica elemental (multiplicación). Cualquier procesamiento de la información puede analizarse en varias niveles. El nivel computacional de descripción implica una descripción de la función matemática que el sistema realiza. Podemos, en ese contexto, asociar ciertas sinapsis a elementos de conmutación.

Junto al proceso computacional importa conocer las bases fisiológicas de los procesos cognitivos (*The Handbook of Cognitive Neuropsychology*) y su evolución (*Evolution and the human mind*). Para lo primero, la ciencia se ha venido apoyando en las discapacidades (de lenguaje, memoria, atención, cognición numérica y otras) subsecuentes a lesiones neurológicas. De ahí el subtítulo de la obra: *What Deficits Reveal about the Human Mind*.

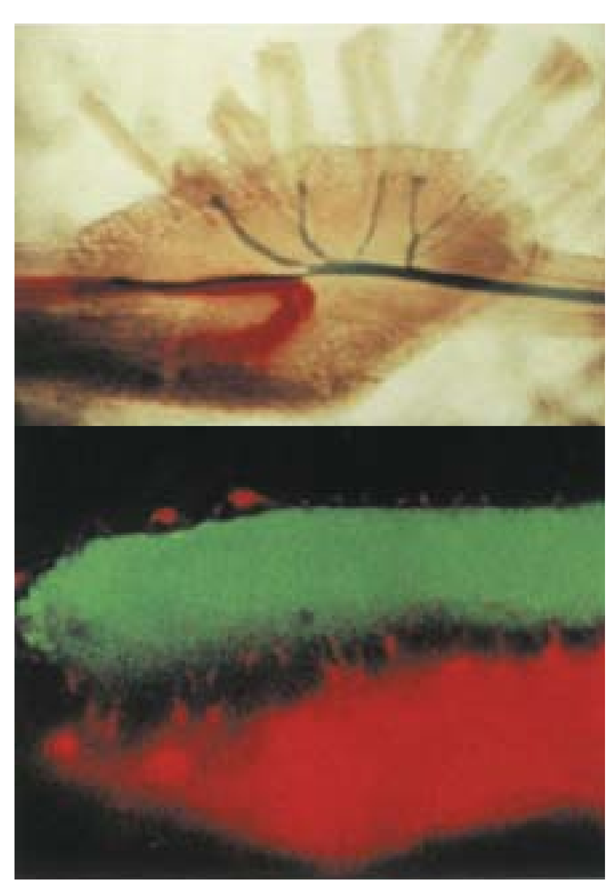
¿Es lo mismo entender una pieza musical que entender un fragmento literario? ¿Aportan nuestros recuerdos un registro preciso de acontecimientos del pasado o inventamos nuestra propia historia? ¿Podemos apreciar la

estructura de una frase sin conocer su significado? ¿Reconocemos el rostro de un amigo del mismo modo que reconocemos un par de palabras? A la resolución de esas cuestiones se han aplicado legiones de filósofos, neurólogos, informáticos, lingüistas y psicólogos.

De entrada, llaman la atención la facilidad y rapidez con que el hombre realiza actividades tan complejas como hablar o entender uno o varios idiomas, manipular estructuras matemáticas o seguir de manera coordinada tareas múltiples. Facilidad y celeridad que obstruyen a veces la aproximación directa. La neuropsicología cognitiva opta por una vía indirecta y mira a través de la rendija que le deja la lesión para desentrañar el procesamiento y representación cognitivos normales, en la esperanza, por ejemplo, de que las pautas de un rendimiento lingüístico mermado (anomía, afasia de Broca) revelen la estructura y organización del sistema lingüístico indemne.

Se sabe de individuos que han perdido toda la información sobre las propiedades visuales de los objetos y retienen, sin embargo, el conocimiento de las propiedades no perceptuales de tales objetos, así como el conocimiento de propiedades perceptuales distintas de las visuales. Con esa observación se nos está diciendo que los objetos no se nos representan en un solo sistema de conocimiento sino que tiene que haber, amén de ese sistema de conocimiento de la apariencia del objeto, otros que respondan de propiedades distintas asociadas al mismo.

Abundando en su explicación, no parece muy verosímil que todas las formas de información perceptual se almacenen juntas con la información no perceptual. Podría darse un sistema para el conocimiento auditivo de los objetos y otro del sistema olfativo; en breve, un sistema para cada uno de los cinco sentidos, más un sistema distinto para un conocimiento de los objetos no perceptual. Bajo ese razonamiento subyace la idea central de modularidad. Supongamos que la tarea cognitiva que nos interese sea la tarea generalísima de comprender los estímulos visuales (objetos, caras o letras impresas). De acuerdo con cierta hipótesis, tal comprensión implica tres estadios de procesamiento: detección de los rasgos visuales, reconocimiento visual y acceso a los significados almacenados. En el marco de ese modelo, habría un solo sistema que contendría representaciones del estímulo visual y un sistema distinto que portaría información sobre el significado asociado al estímulo en cuestión. De acuerdo con esta teoría, pues, el sistema que utilizamos para comprender lo que vemos tiene tres componentes: analizadores de los rasgos visuales, unidades de reconocimiento visual (caras, letras impresas u objetos) y sistema semántico. Porque el sistema que empleamos para comprender lo que vemos consta de tres módulos, tal teoría sería modular. En *The Modularity of the Mind*, Fodor, abanderado de esa propuesta, dotaba a los módulos de varias propiedades características: dominio específico, innato, informativo, rápido, con base nerviosa, autónomo y disjunto.



Anatomía de la sinapsis del calamar gigante. Un axón gigante presináptico de segundo orden se introduce en el nervio palial y se ramifica en extensiones digitiformes, cada una de las cuales establece contacto con un axón de tercer orden postsináptico

Se ha sugerido también que la evolución de los módulos podría dar cuenta de numerosas peculiaridades de la mente humana. (El subtítulo de *Evolution and Human Mind* reza *Modularity, language and meta-cognition*.) Los autores se centran, en efecto, en un conjunto de temas que relacionan consideraciones evolutivas con cuestiones vinculadas a la modularidad y carácter innato de las facultades cognitivas, con la capacidad distintivamente humana del lenguaje, y con la capacidad humana para pensar sobre los procesos mentales de sí mismos y de los demás, el pensamiento sobre el pensamiento, o meta-cognición.

Puesto que el cuerpo humano ha sido moldeado y conformado por presiones evolutivas que operaron en nuestros precursores, parece verosímil que las estructuras y los mecanismos biológicos subyacentes bajo la cognición humana hayan sido objeto de selección. En ese sentido podemos hablar de evolución. Nuestros antepasados homínidos realizaron probablemente transacciones sociales que les resultarían decisivas para la reproducción y la supervivencia. Desarrollaron, pues, algún tipo de mecanismo mental para negociar tales intercambios, es decir, para calcular la estructura de coste-beneficio de un intercambio, para tener pruebas de quién debe qué a quién y para detectar a los ladrones.

Los precursores rudimentarios de estos dominios y facultades cognitivas existen en los primates, pero en sus propiedades principales la mente humana difiere del mundo anímico de los animales no humanos. Lo que causa importantes problemas para una teoría evolutiva de la mente. Por otro lado, las investigaciones del endocráneo de homínidos tampoco llegan más allá de la confirmación de la cuantía y ritmo de crecimiento del volumen encefálico. Las conclusiones de otro tenor extraídas carecen de solidez convincente, como ha quedado puesta de manifiesto en el debate entre Holloway y Falk sobre el tamaño del córtex visual en *Australopithecus* y las dudas sobre la identificación de los centros del lenguaje en los endocráneos del *Homo* primitivo.

LUIS ALONSO